



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ODLÉVÁNÍ TENKOSTĚNNÝCH LITINOVÝCH ODLITKŮ

PRODUCTION OF THINWALL IRON CASTINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Kryštůfek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie

Student: **Bc. Tomáš Kryštůfek**

Studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Slévárenská technologie

Vedoucí práce: **doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.**

Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Odlévání tenkostěnných litinových odlitků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem úkolu je posouzení možnosti výroby tenkostěnných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem z hlediska využití potenciálu jejich vlastností, z hlediska metalurgického i technologického. Zvláštní pozornost by měla být věnována vlivu různých druhů grafitizačních očkovaadel a vlivu rychlosti ochlazování.

Cíle diplomové práce:

Ověřit vliv očkování různými druhy grafitizačních očkovaadel na mikro strukturu a mechanické vlastnosti tenkostěnných odlitků.

Seznam doporučené literatury:

Handbuch der Giesserei - Technik. Springer - Verlag Berlin, 1970. ISBN 978-3-642-86956-3.

CAMPBELL, J. Castings. Oxford: Butterworth - Heinemann, 2006. ISBN 0-7506-4790-6.

ELLIOT, R. Cast Iron Technology. Butterworth - Heinemann. 1988. ISBN 0-408-01512-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

KRYŠTŮFEK Tomáš: Odlévání tenkostěnných litinových odlitků

Tato diplomová práce je zaměřena na výrobu a problémy při výrobě tenkostěnných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem, zejména pak při procesu očkování. Je posuzován vliv prvků na strukturu a mechanické vlastnosti tvárné litiny a také vliv prvků, které se používají v očkovacích předslitinách. Dále jsou rozebrány faktory, které podstatně ovlivňují technologii výroby, tzn. rychlost tuhnutí, tloušťka stěny, rychlost ochlazování a faktory, kterými lze výrobu tenkostěnných odlitků ovlivnit, tedy např. použití izolačních formovacích hmot a zvýšení disperzity grafitu ve struktuře. Na závěr teoretické části jsou rozebrány důležité výrobní procesy, a to očkování a modifikace. Experimentální část je zaměřena na ovlivnění struktury a mechanických vlastností několika typy očkovačů o různém chemickém složení, přičemž zkoumané tloušťky zkušebních destiček jsou 3, 5 a 8 mm. Na těchto destičkách je vyhodnocována tvrdost, pevnost a tažnost. Nakonec byly z některých vzorků udělány metalografické výbrusy, načež se zkoumal podíl feritu ve struktuře, tvar a velikost kuliček grafitu.

Klíčová slova: litina s kuličkovým grafitem, tenkostěnné odlitky z tvárné litiny, očkování, vliv očkování tvárné litiny na strukturu a mechanické vlastnosti

ABSTRACT

KRYŠTŮFEK Tomáš: Production of thinwall iron castings

This diploma thesis is focused on production and problems in production of thin-walled ductile iron castings, especially in the inoculation process. The focus is on the influence of elements on the structure and mechanical properties of ductile iron and as well as the influence of some elements, that are commonly used in inoculation alloys. Furthermore, the factors that affect the production technology are written, i.e., solidification rate, wall thickness, cooling rate, and factors used for affecting the thin-walled castings production, i.e., the use of insulating moulding compounds and increasing the graphite nodule count. At the end of the theoretical part, important production processes are analysed, namely inoculation and spheroidization. The experimental part is focused on influencing the structure and mechanical properties using several types of inoculants of different chemical compositions, whereas the tested thicknesses of the test plates are 3-, 5- and 8-mm. Hardness, tensile strength and ductility are evaluated on these plates. Finally, the volume of ferrite in the structure, shape and size of the graphite nodules were examined.

Keywords: ductile cast iron, thin-walled ductile iron castings, inoculation, effect of inoculation on structure and mechanical properties of ductile cast iron

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRYŠTŮFEK, Tomáš. Odlévání tenkostěnných litinových odlitků [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132996>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaromír Roučka.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V dne 20. 5. 2021

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval panu doc. Ing. Jaromíru Roučkovi, CSc. za jeho cenné rady, připomínky a podněty při vypracovávání této závěrečné práce. Dále bych chtěl poděkovat všem zaměstnancům a studentům ÚST oboru Slévárenství, bez jejichž pomoci by tato práce nemohla vzniknout. Významné ocenění také náleží mé rodině za bezmeznou hmotnou i duševní podporu v průběhu studia.

OBSAH

ZADÁNÍ

ABSTRAKT

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

PODĚKOVÁNÍ

OBSAH

ÚVOD	10
1 LITINA S KULIČKOVÝM GRAFITEM.....	11
1.1 STRUKTURA A CHEMICKÉ SLOŽENÍ LKG.....	11
2 VLIV PRVKŮ NA STRUKTURU A MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	13
2.1 LEGUJÍCÍ PRVKY	13
2.2 KOVY VZÁCNÝCH ZEMIN.....	14
2.3 STOPOVÉ PRVKY.....	15
3 TENKOSTĚNNÉ ODLITKY Z LKG	16
3.1 RYCHLOST TUHNUTÍ A TRANSFORMACE AUSTENITU	16
3.2 TUHNUTÍ VELMI TENKÝCH STĚN.....	17
3.3 VLIV TLOUŠŤKY STĚNY ODLITKU NA RYCHLOST TUHNUTÍ	18
3.4 EXPERIMENTÁLNÍ METODY TUHNUTÍ TENKOSTĚNNÝCH ODLITKŮ.....	19
3.4.1 Archimédova spirála	19
3.4.2 Horizontální zkušební destičky.....	21
3.4.3 Vertikální zkušební destičky.....	21
3.5 VLIV RYCHLOSTI OCHLAZOVÁNÍ	22
3.6 VLIV TLOUŠŤKY STĚNY NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	22
3.7 ZÁSADY VÝROBY TENKOSTĚNNÝCH ODLITKŮ Z LKG.....	23
3.7.1 Izolační formovací hmoty	23
3.7.2 Vysoká disperzita grafitu	25

4 GRAFITIZACE A OČKOVÁNÍ	26
4.1 HETEROGENNÍ NUKLEACE	26
4.2 TEORIE NUKLEAČNÍCH MECHANISMŮ GRAFITU	27
4.3 RŮST GRAFITU.....	28
4.4 VZNIK VHODNÝCH KRYSTALIZAČNÍCH ZÁRODKŮ	30
4.5 ODEZNÍVÁNÍ OČKOVACÍHO ÚČINKU	30
4.6 VLIV AKTIVNÍCH PRVKŮ V OČKOVACÍCH PŘEDSLITINÁCH	32
4.7 METODY OČKOVÁNÍ.....	32
4.8 POUŽÍVANÁ OČKOVADLA	34
5 MODIFIKACE.....	35
5.1 MODIFIKAČNÍ ÚČINEK KVZ.....	37
6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	38
6.1 MODEL A FORMOVÁNÍ.....	38
6.2 POUŽITÁ OČKOVADLA.....	38
6.3 TAVBY A ODLÉVÁNÍ.....	39
6.3.1 Tavba A.....	40
6.3.2 Tavba B.....	40
6.3.3 Tavba C.....	41
6.3.4 Tavba D.....	41
6.3.5 Tavba E.....	41
6.4 VYHODNOCENÍ TVRDOSTI.....	42
6.5 VYHODNOCENÍ PEVNOSTI A TAŽNOSTI.....	48
6.6 VYHODNOCENÍ STRUKTUR	52
6.7 OSOVÉ ŘEDINY	58
6.8 SIMULACE.....	61
ZÁVĚR.....	63

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

SEZNAM OBRÁZKŮ

SEZNAM TABULEK

SEZNAM GRAFŮ

ÚVOD

Litinové odlitky jsou hlavní tepnou slévárenského průmyslu nejen v Evropě, ale i po celém světě. Jen pro představu bylo v roce 2016 v České republice odlito zhruba 158 000 tun litiny s lupínkovým grafitem – známou též pod názvem šedá, zkratka LLG – a 48 000 tun litiny s kuličkovým grafitem – známou pod názvem tvárná, zkratka LKG. Obecně jsou odlitky na bázi železa, tj. oceli a litiny, nejrozšířenějším výrobním odvětvím slévárenství. Mezi hlavní odběratele litinových odlitků patří automobilový průmysl, průmysl zabývající se výrobou tvářecích a obráběcích strojů a zařízení a součásti určené k přenosu mechanické energie. [1], [2]

Moderním trendem výroby odlitků je v posledních letech neustálá snaha o to šetřit co nejvíce energií a surovin při zpracovávání materiálů. To vyústilo v čím dál tím více používané lehké neželezné kovy, zejména pak v automobilovém průmyslu je tato snaha nejvíce vidět. Je ale jasné, že tyto kovy nemohou nahradit odlitky ze slitin na bázi železa, zejména co se pevnostních a únavových vlastností týče. Tyto vlastnosti musí konstruktéři kompenzovat navrhováním součástí buď o větší tloušťce nebo s použitím žebrovaní. Další variantou, jak vyrábět lehké odlitky s požadovanými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi s co nejnižšími náklady na výrobu a spotřebované suroviny, je použití tenkostěnných odlitků z litiny – tloušťka stěny se pohybuje až do 2 mm. Výroba těchto tenkostěnných litinových součástí je velmi náročná z hlediska chování tekutého kovu ve formě při rychlém odvodu tepla o takto malých tloušťkách, ovšem úspory zdrojů a energie nutí výrobce odlitků v tomto novém trendu pokračovat. [3]

Litiny zaštiťují celou škálu pevnostních hodnot, od 100 MPa až do 900 MPa meze pevnosti, a to stále bez použití tepelného zpracování – poté lze dosáhnout normované pevnosti až 1400 MPa. Vhodnou kombinací pevnosti a tažnosti tedy může odlitek z litiny nalézt v průmyslu široké uplatnění. Obecně mají litiny oproti ocelím výhodu v nižší teplotě tavení, tedy jejich výroba není tolik náročná na spotřebu energií a formovací materiály jsou vystaveny menšímu teplotnímu namáhání – z tohoto důvodu nejsou litinové odlitky tolik náchylné na vznik povrchových vad, tzv. zapečenin. Formovací směs se obvykle skládá pouze z obyčejného křemenného ostříva. Vyzdívky pecí a pánví jsou teplotně méně namáhány, proto je lze používat delší výrobní čas. Oproti ocelím má také litina menší smrštění a stahování, proto se při výrobě odlitků nemusí používat masivního nalitkování, jak je tomu u ocelí – opět dochází k výrazným úsporám. Litina také disponuje lepší zabíhavostí než ocel, proto může být tvar odlitků složitější s nižší tloušťkou stěn. Legované litiny se vyznačují vlastnostmi jako otěruvzdornost, korozivzdornost a žáruvzdornost a nízkým součinitelem tepelné roztažnosti. [4], [5]

1 LITINA S KULIČKOVÝM GRAFITEM

Dovednost vyrábět litinové odlitky byla lidstvu známa už asi od 4. st. př.n.l., v Evropě se jejich výroba datuje do 14. st. n.l. Litina s kuličkovým grafitem byla poprvé zveřejněna jako zajímavost v r. 1936 na slévárenském kongresu v Německu, v Československu byla její výroba zavedena až v r. 1949. Obecně se litiny definují jako slitiny železa a uhlíku, kdy obsah uhlíku je vyšší než maximální rozpustnost uhlíku v austenitu, přesně je to 2,08 % C. Uhlík je v litinách vyloučen buď jako grafit (čistý uhlík), který se vytváří v grafitických litinách, nebo jako karbid železa Fe_3C (cementit), který vzniká v bílé litině. Krystalizaci grafitických litin lze popsat pomocí stabilního diagramu železo-uhlík Fe-C, bílou litinu pak podle metastabilního diagramu železo-cementit Fe- Fe_3C . [2], [5]

V LLG tvoří grafit lamelární částice, tzv. lupínky, které ovšem v kovové matici představují vruby, proto nejsou mechanické vlastnosti – pevnost, tvrdost, tažnost a houževnatost – této litiny na takové úrovni jako mechanické vlastnosti LKG. V ní tvoří grafit zrnité, sférické částice (kuličky), které jsou jako vruby v matici příznivější, a proto také mechanické vlastnosti této litiny dosahují podstatně vyšších hodnot. Obecně mezi přednosti z hlediska vlastností litin patří v porovnání s oceli nižší měrná hmotnost, dobrá obrobitelnost, vynikající schopnost útlumu mechanických kmitů a rázů a až několikanásobně vyšší pevnost v tlaku než v tahu. [2], [5], [6]

Strukturu litin tvoří kovová matrice, tzv. základní kovová hmota, skládající se z grafitu a dále z feritu a perlitu. Ferit je nositel tažnosti a houževnatosti, perlit naopak pevnosti a tvrdosti. Následným tepelným zpracováním nebo také legováním lze ve struktuře nalézt základní kovovou hmotu s částečným nebo úplným výskytem austenitu, martenzitu nebo bainitu. Mechanické vlastnosti LKG jsou tedy ovlivněny tvarem a disperzitou grafitu, tj. počtem kuliček na mm^2 a vlastnostmi a strukturou základní kovové hmoty. Zásadní roli hraje také rychlost ochlazování ve formě a chemické složení. Rychlost ochlazování se odvíjí od toho, jaké ostřívo je při odlévání použito (tepelná akumulace formy) a zejména, jaká je tloušťka stěn odlitku. Chemické složení litiny určuje polohu eutektického bodu, což lze také vyjádřit tzv. stupněm eutektičnosti (stupeň sycení). [2], [5], [6]

1.1 Struktura a chemické složení LKG

Chemické složení LKG je dle stabilního, resp. metastabilního diagramu, většinou eutektické až nadeutektické. Při návrhu složení je ovšem vyžadována nutnost brát v úvahu tloušťky stěn odlitku a rychlost ochlazování taveniny ve formě. Základními prvky všech litin, stejně jako ocelí, jsou uhlík, křemík, mangan, fosfor a síra. Důležitými prvky v LKG jsou také hořčík a měď. Běžné obsahy těchto prvků v nelegované LKG vyjadřuje následující tabulka (tab. 1). [2], [6]

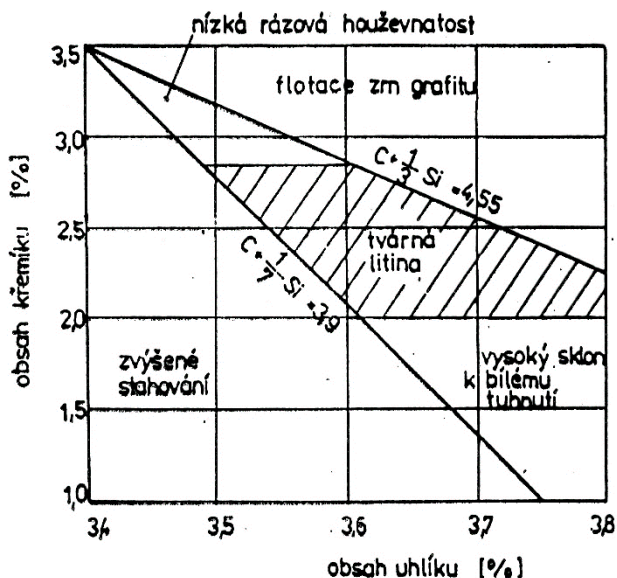
Tab. 1: Rozmezí obsahů základních prvků v nelegované LKG [2]

Prvek	Min. %	Max. %
C	3,2	4,0
Si	2,0	3,0
Mn	0,1	0,8
P		0,08
S zbytková		0,01
Mg zbytkový	0,03	0,06
Cu		1,5

Nutnost zajistit kvalitní vsázkové suroviny s minimálním obsahem nečistot, fosforu a síry je u LKG podstatně vyšší než u LLG. Fosfor sice zvyšuje zabíhavost litiny, má ovšem velmi negativní vliv na mechanické vlastnosti – tažnost a houževnatost, neboť segreguje na hranicích

zrn a tvoří síťové fosfidické eutektikum $\text{Fe-Fe}_3\text{C-Fe}_3\text{P}$, tzv. steadit. Důrazně se proto doporučuje zajistit minimální obsah fosforu, a to zejména u silnostěnných odlitků. Nízký obsah síry ve vsázce je nutný z hlediska vysoké afinity hořčíku a síry. Hořčík je modifikační prvek, díky němuž vznikají v litině grafitické kuličky, ovšem při vysokém obsahu síry je jeho spotřeba příliš vysoká, což jednak zvyšuje náklady na výrobu LKG, ale také způsobuje problémy při samotném výrobě litiny – při modifikaci předslitinou FeSiMg by při vysokém obsahu síry a jejímu vázání na hořčík nebylo možné splnit požadavek na maximální povolený obsah křemíku, vzhledem k vysoké spotřebě modifikovačů a dále by mohly vznikat oxidy a sulfidy hořčíku podporující vznik tzv. sekundární strusky, která obecně zhoršuje čistotu taveniny. [2], [5], [6]

Vhodný obsah uhlíku a křemíku se v litině stanovuje uhlíkovým ekvivalentem, který se ale také volí na základě tloušťky stěn odlitku, tedy rychlosti ochlazování. Platí hyperbolická závislost tloušťky stěny na uhlíkovém ekvivalentu, a sice, že s rostoucí tloušťkou stěny je potřeba volit nižší uhlíkový ekvivalent dané LKG. Uhlík má pozitivní vliv na stahování odlitku, neboť při jeho vyšším obsahu se při stabilním tuhnutí vyloučí více grafitu a tím se sklon ke stahování sníží. Křemík je prvek podporující vznik feritu a grafitu, tedy feritotvorný a grafitotvorný, avšak z hlediska mechanických vlastností snižuje tažnost a rázovou houževnatost. Příznivé obsahy uhlíku a křemíku znázorňuje vyšrafovanou částí tzv. Hendersonův diagram (obr. 1). [2], [5], [6]



Obr. 1: Oblast optimálních obsahů C a Si [2]

Mangan by se za jiných okolností vázal na síru, jelikož je jí ale v LKG minimální množství, působí karbidotvorně a zejména perlitotvorně – pokud se vyžaduje feritická struktura, je důležité udržet mangan na co nejnižším obsahu. Karbidotvorně pak působí mangan převážně v silnostěnných odlitcích, jelikož segreguje na hranicích zrn v pomalu tuhnoucích místech odlitku, a právě tam dochází k tvorbě mezidendritických karbidů. Místo legování manganem se proto využívá legování mědi právě k dosažení perlitické struktury a k zajištění bezpečného tuhnutí bez tvorby karbidů u tlustostěnných odlitků. Stabilizaci perlitu je možné provést také přidáním cínu, který má několikanásobně silnější účinek než měď, ovšem podporuje vznik mezibuněčného lupínkového grafitu, proto se jeho použití spíše nedoporučuje. [2], [5], [6]

2 VLIV PRVKŮ NA STRUKTURU A MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Všechny slitiny železa vždy obsahují základní prvky (C, Si, Mn, P, S), jejichž účinek již byl popsán. Kromě těchto prvků mohou být v litinách také prvky legující, kterými se ovlivňuje struktura a vlastnosti, které nelegovaným litinám chybí. Prvky, kterými je možné ovlivnit strukturu, se dělí na:

- feritotvorné (Si, Al),
- perlitotvorné (Mn, Cu, Sn),
- austenitotvorné (obsah Ni > 18 %).

Z hlediska vlivu prvků na grafitizaci během eutektického tuhnutí se prvky dělí na:

- grafitizační (Al, Si, C, Ni, Cu),
- antigrafitizační (B, Ce, Mg, Te, V, Cr, S),
- neutrální (Mn, W, Co).

Dále prvky dělíme na sferoidizační, které se používají při výrobě (modifikaci) tvárné litiny (Mg, Ca, Ce, Y, La) a prvky stopové, resp. nečistoty (Pb, Sb, Bi, As), které se dostávají do taveniny zejména po přidání špatně roztříděného šrotového materiálu a mají především negativní vliv na tvar vylučovaného grafitu. [2], [7]

2.1 Legující prvky

Měď je slabě grafitizační prvek, který se v LKG používá zejména k podpoře vylučování perlitu ve struktuře, a to v množství asi od 0,5 do 1,5 %. Tím dojde k zvýšení mechanických vlastností, a sice pevnosti a tvrdosti litiny. Grafitizační schopnost mědi je asi desetkrát menší než křemíku. Zároveň tedy do jisté míry napomáhá příznivému vylučování uhlíku ve formě grafitu a nikoliv karbidů, ovšem při obsahu nad 1 % Cu může způsobovat mírnou degeneraci grafitu. Je velmi vhodné přidávat do taveniny elektrovednou měď, tedy měď bez nečistot a stopových prvků (As, Pb, Te, Sb), které by mohly způsobovat degeneraci kuličkového grafitu, neboť je jejich účinek za přítomnosti mědi v litině o to silnější. V kombinaci s Ti nebo Pb podporuje měď vylučování mezibuněčného vločkového grafitu. [2], [7], [8]

Nikl je přidáván do taveniny až do obsahu asi 4 %, obdobně jako měď působí slabě grafitizačním účinkem a opět se využívá k stabilizaci perlitu ve struktuře čímž zvyšuje pevnost a tvrdost LKG (zejména v kombinaci s Mo a Cu). Při obsahu niklu od 18 do 36 % dochází ve struktuře při tuhnutí k stabilizaci austenitu – tyto grafitické litiny, které mají základní kovovou hmotu tvořenou austenitem, se označují názvem Ni-resist. Litiny legované niklem se vyznačují vyšší pevností, korozivzdorností, odolností proti opotřebení, žáruvzdorností a houževnatostí za nízkých teplot (nevykazují tranzitní chování). Dle normy DIN 1694, resp. ASTM A 439, je pevnost v tahu austenitických LKG při pokojové teplotě od 370 do 500 MPa a tažnost od 7 do 40 %. Nevýhodou niklu je, že může podporovat vznik chunky grafitu. [2], [4], [8]

Chrom je antigrafitizační a zejména karbidotvorný prvek podporující metastabilní tuhnutí LKG, proto je nutné jeho sklon ke vzniku stabilních karbidů kompenzovat přidáním mědi. Při obsahu chromu větším než asi 2-3 % začíná litina tuhnout bíle. Na druhou stranu zvyšuje počet kuliček grafitu, je tedy možné ho přidávat jako aktivní prvek do očkovaadel. Působí také jako perlitotvorný prvek, takže zvyšuje pevnost a tvrdost, ovšem zapříčiňuje vznik intercelulárního grafitu a segreguje na hranicích zrn. V austenitických tvárných litinách se chrom používá k zlepšení korozní odolnosti. Obsah chromu v tvárné litině se může pohybovat asi od 0,3 do 0,5 %. V legovaných chromových litinách je obsah Cr až 35 %, tyto litiny ovšem nepatří do grafitických, nýbrž do bílých. Do taveniny se dostává z ocelového a litinového odpadu. V litinách, jejichž struktura má být feritická, musí být obsah chromu asi jen do 0,04 %, ideálně však žádný. [2], [4], [8]

Molybden je mírně antigrafitizační karbidotvorný prvek, který je schopen v kombinaci s některými perlitotvornými prvky (Cu, ale hlavně Ni a Cr) stabilizovat perlitickou strukturu a

její vlastnosti za vyšších teplot. Otáhal [8] uvádí, že přísada 1 % Mo zvyšuje pevnost asi o 40-45 MPa a tvrdost asi o 15 HB za současného snížení tažnosti asi o 8 %. Molybden také zvyšuje creepovou pevnost a odolnost proti únavě za vyšších teplot. Nevýhodou je jeho vysoká pořizovací cena a také to, že může silně segregovat na hranicích zrn a vytvářet zde stabilní karbidy, a to při obsahu 0,5 % Mo a více. Přípustný obsah molybdenu v LKG se udává do 1 %. Do taveniny se přidává jako předslitina FeMo (62 % Mo) nebo jako oximolybdenové brikety. Využití této legury je zejména u odlitků, které mají jak silnostěnné, tak tenkostěnné průřezy, neboť molybden snižuje citlivost na rychlost ochlazování. [2], [7], [8]

Cín se v tvárné (ale i šedé) litině využívá ke stabilizaci perlitu, a sice do obsahu max. 0,15 %. Zvyšuje pevnost a tvrdost LKG, ovšem v praxi se většinou místo cínu používá k dosažení perlitické struktury měď. Cín může způsobovat vznik intercelulárního vločkového grafitu a zkřehnutí litiny, a to už od obsahu asi 0,08 %. Narušuje také vylučování feritu. [2], [8]

2.2 Kovy vzácných zemin

Než se přišlo na modifikační účinek hořčíku, byl původním prvkem využívaným k modifikaci cér. V dnešním slévárenském průmyslu se cér a další prvky vzácných zemin používají spíše než k modifikaci, tak k tvorbě nukleačních zárodků grafitu a neutralizaci negativního vlivu stopových prvků. Do taveniny se KVZ mohou dostávat jednak jako tzv. „mischmetal“, tj. jako křemičitany těchto prvků. Mischmetal se skládá z asi 50 % Ce, 33 % La, 12 % Nd, 4 % Pr a zbytek je tvořen Y a dalšími prvky. Další variantou je slitina známá jako „high-cer-rare-earths“, která obsahuje asi 90 % Ce, 5 % La, 2 % Nd, 1 % Pr, Y a další prvky. Cér má podobně vysokou afinitu ke kyslíku a síře jako hořčík, takže je dobrý dezoxidovadlem, a zároveň vytváří sulfidy CeS, které tvoří jádra nukleačních zárodků grafitu. Stejně jako hořčík je silným karbidotvorným prvkem, což se projevuje zejména v tenkostěnných odlitcích při jeho vyšším zbytkovém obsahu. Otáhal [8] uvádí, že z tohoto důvodu musí mít výchozí litina vysoký obsah uhlíku, a sice nad 3,8 %, a musí být provedeno důkladné sekundární očkování. Nejvyšší disperzita grafitu při přidání céru do taveniny vzniká, pokud se jeho zbytkový obsah pohybuje mezi 0,016-0,019 %. Pozitivní vlastností céru je jeho delší odeznívací účinek v porovnání s hořčíkem. Litina má tím menší sklon k tvorbě karbidů, čím je menší poměr KVZ ku celkovému množství modifikačních přísad. Pokud jsou v tavenině přítomné stopové prvky (Ti, Pb, Sb, As), dokáže cér potlačit jejich negativní vliv, a to už od obsahu asi 0,005 %. U silnostěnných odlitků může cér i ostatní KVZ, pokud je jejich zbytkový obsah příliš vysoký, vytvářet chunky grafitu a způsobovat flotaci grafitu. Proti tomu účinně působí kontrolované množství (50-100 ppm) stopových prvků v tavenině (Sb, Pb). [7], [8]

Pokud se v tavenině nachází lanthan, může se ve struktuře místy vyskytovat vermikulární grafit. Při obsahu lanthanu nad 0,05 % v kombinaci s hořčíkem z modifikační předslitiny je možné dosáhnout zcela feritické struktury s vysokou disperzitou grafitu, ovšem záleží na tloušťce stěny, a tím spíše na rychlosti ochlazování taveniny v dutině formy. Lanthan má podobně vysokou afinitu ke kyslíku a síře jako cér, napomáhá tedy jako dezoxidační a odsiřovací prostředek, a zároveň je silnějším prvkem pro nukleaci grafitizačních zárodků. Stejně jako cér může způsobovat vyšší sklon k tvorbě karbidů v tenkostěnných odlitcích a chunky grafitu v odlitcích silnostěnných. [7], [8]

Neodym i praseodym jsou silné karbidotvorné prvky, které mohou způsobovat vznik vermikulárního grafitu ve struktuře litiny s nízkým obsahem síry, kterou tvárná litina bezpochyby je. Z tohoto důvodu musí být zbytkový obsah neodymu do 0,01 % a praseodymu do 0,03-0,05 %. Yttrium podporuje vznik kuličkového grafitu, a sice do obsahu 0,1-0,2 %, nicméně jeho cena na trhu je velmi vysoká. [7], [8]

2.3 Stopové prvky

Tellur se do taveniny může dostávat z některých nátěrů forem nebo z nedostatečně čistých přísad mědi. Do obsahu asi 0,003 % může v tavenině zabraňovat vzniku bodlin. Jinak je to ovšem silně karbidotvorný prvek, který způsobuje destrukci kuličkového grafitu a pokles mechanických vlastností jako pevnosti a tvrdosti. S hořčíkem tvoří tzn. telluridy, takže stejně jako např. síra zvyšuje spotřebu modifikační předslitiny. Negativní vliv telluru se dá eliminovat přísadou céru. Pokud je to možné, neměl by se do taveniny přidávat ani záměrně. [7], [8]

Již při obsahu 0,002 % olova v LKG dochází k degradaci kuličkového grafitu na lupínkový nebo na mezibuněčný vločkový, je tedy naprosto omezen sferoidizační účinek hořčíku. Neutralizovat lze negativní vliv olova přidáním modifikační předslitiny s obsahem některého kovu vzácných zemin, např. céru, neboť díky tomu dojde k vytvoření sloučenin RE-Pb („RE“ je z angl. *rare-earth element*, tedy KVZ). Např. dle Otáhalo [8] je pevnost nespecifikované tvárné litiny z Y1-bloku 463 MPa při obsahu 0,004 % Pb, při nepatrném zvýšení obsahu olova na 0,013 % už je pevnost stejné LKG pouze 327 MPa, poté po přidání 0,021 % Ce dojde ke zvýšení pevnosti na 446 MPa. [2], [7], [8]

Titan se do tvárné litiny dostává především ze surových želez a z vratného odpadu. Do taveniny se také může dostat, pokud by byl použit vratný materiál z litiny s červíkovým grafitem, neboť se titan používá k částečné neutralizaci hořčíku právě při výrobě této litiny. Ve velmi tenkostěnných odlitcích je možné mít obsah titanu do 0,07 %, v odlitcích silnostěnných pak asi do 0,02 %, obecně se ale doporučuje nepřekročit hranici obsahu titanu v tavenině nad 0,035 %. Zejména v kombinaci s hliníkem napomáhá vzniku vodíkových bodlin. [7], [8]

Hliníkem se mohou litiny legovat, ovšem může být také vnímán jako rušivý stopový prvek. Do taveniny se dostává z vratného materiálu, ocelového šrotu nebo feroslitin, zejména pak bývá obsažen jako jeden z aktivních prvků v očkovacích předslutinách, takže napomáhá tvorbě nukleačních zárodků grafitu. Podporuje také vylučování feritu ve struktuře a do jisté míry dokáže neutralizovat dusík. Spíše než tenkostěnné jsou především silnostěnné odlitky náchylné na jeho přítomnost v tekutém kovu. Hliník má podobný vliv na vznik červíkového grafitu jako titan, ovšem ne tolik silný. Vyložení negativním vlivem je pak vysoký sklon litiny k tvorbě vodíkových bodlin, a to při obsahu vyšším než asi 0,015 %. Napomáhá také vzniku sekundární strusky. [7], [8]

Antimon má sklon při tuhnutí segregovat do mezidendritických oblastí a vytvářet zde síťový z lupínkového grafitu, tím porušovat strukturu základní kovové hmoty a snižovat tak mechanické vlastnosti, zejména pevnost a tvrdost. Je také silným karbidotvorným prvkem. Tyto negativní účinky lze eliminovat vhodnou přísadou céru. Na druhou stranu je antimon perlitotvorný a rovněž může podporovat vznik vhodných nukleačních zárodků grafitu, např. při obsahu 0,002 %, ovšem pouze za přítomnosti některého z prvků vzácných zemin. Je také vhodným prvkem, který zabraňuje vzniku chunky grafitu, a to při obsahu 50-100 ppm. Do taveniny se většinou dostává z ocelového odpadu ve vsázce. [7], [8]

Bismut se dostává do taveniny ze vsázky, bývá také obsažen v některých očkovadlech, anebo je součástí některých speciálních nátěrů forem. Spolu s olovem je považován za jeden z nejhorších prvků v LKG, pokud se v tavenině vyskytuje bez přítomnosti kovů vzácných zemin. Již od obsahu několika tisícín procent může způsobovat degradaci kuličkového grafitu a výrazně snižovat mechanické vlastnosti. Současně podporuje vznik karbidů ve struktuře a způsobuje tzv. Widmanstättenův grafit, a to již při obsahu asi 0,003 %. Ovšem v kombinaci s KVZ, právě při procesu očkování, má vliv pozitivní, neboť společně s nimi tvoří více zárodků pro nukleaci grafitu a tím ve výsledku zvyšují jeho disperzitu ve struktuře, což se kladně promítne na mechanických vlastnostech. To má význam zejména v tenkostěnných odlitcích, kde je vyšší riziko nesprávného vylučování uhlíku ve formě karbidů. Na druhou stranu až příliš vysoká disperzita způsobuje vznik pórovitosti ve struktuře. [2], [7], [8]

3 TENKOSTĚNNÉ ODLITKY Z LKG

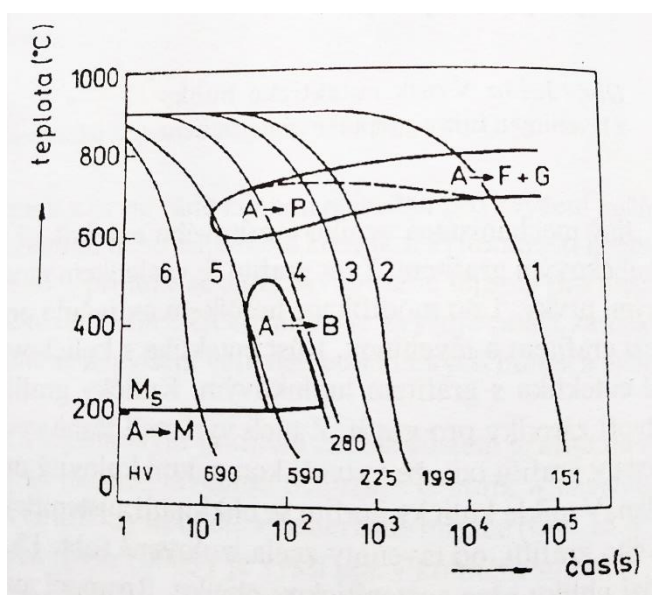
Výsledek současného trendu – vysoká výroba a používání automobilů, jako nejčastějšího dopravního prostředku – je podle některých vědců závažný ekologický problém. Bezpochyby dochází k nadměrnému znečišťování životního prostředí a ovzduší a soustavnému narušování ozónové vrstvy. V důsledku toho začaly koncerny vyrábějící automobily zvažovat, jak co nejvíce emise vznikající při spalování omezit, a to např. neustálým zdokonalováním spalovacího cyklu a snižováním hmotnosti automobilů. Uvádí se, že snížení hmotnosti automobilu o 100 kg vede k úspoře půl až jednoho litru paliva na sto kilometrů. V důsledku toho přecházejí někteří výrobci k náhradě součástí zhotovených ze slitin hliníku za slitiny železa, a to těch součástí, které se tradičně z železných slitin vyráběly. Aby však došlo ke kýžené úspoře energií na výrobu a paliva při zachování stejných mechanických vlastností, musí být tyto součásti tenkostěnné, a to kvůli hustotě železa, která je asi třikrát vyšší než hustota hliníku. Náhrada tenkostěnných odlitků z litiny za odlitky ze slitin hliníku ovšem nemusí být vždy to nejlepší řešení. Je potřeba zohlednit celkové náklady spojené s výrobou těchto součástí, kompatibilitu a opotřebení materiálu s dalšími součástmi stejně jako mechanické vlastnosti za pokojové, a především za zvýšené teploty. [9]

Kovová matrice tenkostěnných odlitků z tvárné litiny je feriticko-perlitická. Byť je tuhnutí odlitků o velmi tenkých průřezích rychlé, k dosažení pouze perlitické struktury je potřeba přidat do taveniny některý z prvků podporující právě tuto strukturu. Při pomalejší rychlosti tuhnutí vzniká struktura s větším zastoupením feritu. Feriticko-perlitická struktura vzniká jako důsledek eutektoidní transformace austenitu. Vznik perlitu, resp. feritu lze podpořit perlitotvornými, resp. feritotvornými prvky. Těmito prvky jsou:

- feritotvorné – Si, Al
- perlitotvorné – Mn, Cu, Ni, Sn, Sb, Cr, V, W, B. [2], [7]

3.1 Rychlost tuhnutí a transformace austenitu

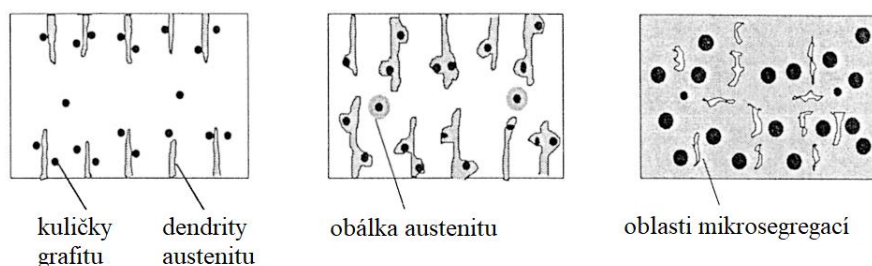
Austenit se při eutektoidní transformaci rozpadá na ferit a grafit při pomalém tuhnutí a na perlit a grafit při tuhnutí rychlém. Perlit je tvořen lamelami cementitu Fe_3C , na které se nabalují lamely feritu. Za rovnovážných podmínek probíhá transformace austenitu mezi teplotami A_{11} a A_{12} , tato struktura bude zcela feritická. Při pomalém ochlazování probíhají tyto přeměny stejně jako u ocelí, což je zřejmé z diagramu ARA (obr. 2). V případě, že se rychlost ochlazování bude zvyšovat, dochází k přechlazení austenitu, který transformuje nejprve na ferit a poté pod teplotou A_{11} na perlit. Tato struktura pak bude feriticko-perlitická. Platí, že s rostoucí rychlostí ochlazování, roste podíl perlitu v této struktuře. Čistě perlitická struktura vzniká pouze pod teplotou A_{11} při dosažení a překročení určité rychlosti ochlazování metastabilní přeměnou austenitu na perlit. Není ale pravda, že perlit vzniká pouze v tenkých průřezích odlitků nebo pouze tam, kde je vysoká rychlost tuhnutí. Přísadovými perlitotvornými prvky se zvyšuje jeho stabilita a v diagramu ARA se křivky rychlosti ochlazování posouvají směrem doprava. To znamená, že i v průřezích s tlustou stěnou a pomalou rychlostí ochlazování je možné dosáhnout perlitické struktury. [6]



Obr. 2: ARA diagram nelegované LKG [6]

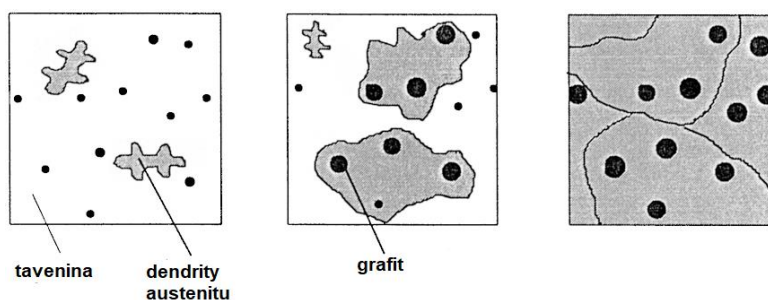
3.2 Tuhnutí velmi tenkých stěn

Tuhnutí tenkostěnných odlitků vlivem vysoké rychlosti ochlazování lze popsat jako nerovnovážné s vysokým přechlazením, proto vznikají v nadeutektické litině dendrity austenitu. Dendrity austenitu nejprve nukleují pod eutektickou teplotou a rostou vlivem nerovnovážného tuhnutí. Tyto dendrity jsou tenké a dlouhé a rostou směrem od okraje odlitku do jeho středu kolmo na stěnu odlitku, proto by se dalo říct, že se jedná o tzv. usměrněné tuhnutí. Jejich počet závisí na rychlosti tuhnutí a tloušťce stěny – s rostoucí tloušťkou stěny se jejich počet zmenšuje a délka zkracuje. Dále se po nukleaci a počátku růstu dendritů začínají nukleovat kuličky grafitu právě poblíž těchto dendritů, neboť je tavenina kolem nich nasycena uhlíkem. Dendrity pak začínají obklopotvat tyto grafitové kuličky, dokud se kolem nich nevytvoří souvislá vrstva austenitu a poté dochází k růstu kuliček vlivem difuze uhlíku skrz austenitovou obálku (obr. 3). [10]



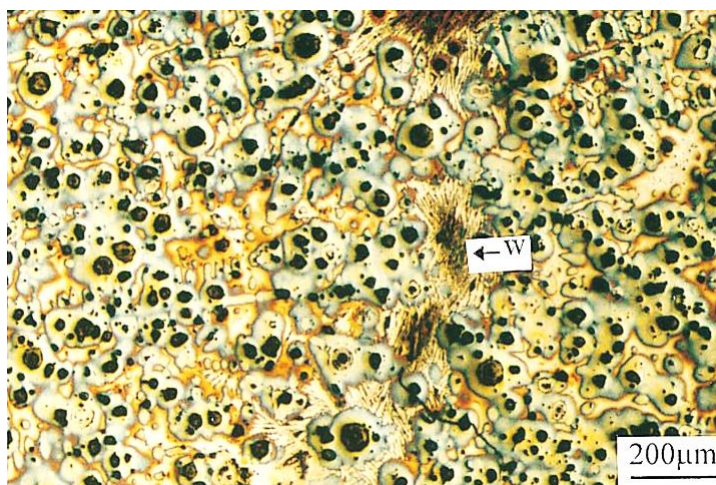
Obr. 3: Tuhnutí tenkostěnných odlitků z LKG [10]

Tuhnutí odlitků z LKG s tloušťkou stěny, která se nepovažuje za tenkostěnnou (větší než cca 10-15 mm), nebývá usměrněné, ale je podobné tuhnutí v tenkých stěnách ovšem s rozdílnou morfologií vzniklé struktury (obr. 4). [10]



Obr. 4: Tuhnutí odlitků z LKG s normální tloušťkou stěny [10]

Důležitým poznatkem rychlého tuhnutí v tenkých průřezích je sklon ke vzniku oblastí mikrosegregací prvků obsažených v tavenině, což může mít negativní vliv na mechanické vlastnosti LKG. Mangan segreguje do mezidendritické oblasti, tím pádem je jím ochuzen samotný dendrit. Křemík se naproti tomu chová obráceně, tedy jeho koncentrace klesá mezi dendrity a zvyšuje se přímo v dendritech. Dendrity s vyšším obsahem křemíku tuhnou dříve a mezidendritická struktura s vyšším obsahem manganu později.



Obr. 5: Mezidendritické karbidy ve struktuře [10]

Protože má křemík grafitizační schopnost a mangan antigrafitizační, oblasti s nižším obsahem křemíku, a naopak s vyšším obsahem manganu, budou tuhnout nikoliv stabilně, ale metastabilně. V důsledku toho bude litina tuhnout bíle (lokální zákalka) a budou v těchto místech vznikat mezidendritické karbidy (obr. 5, označeno písmenem „w“). [10], [11]

3.3 Vliv tloušťky stěny odlitku na rychlost tuhnutí

Struktura litiny je snad nejvíce než kterýkoli jiný materiál náchylná na rychlost tuhnutí a s tím související tloušťku stěny. Jednak má tloušťka stěny nemalý vliv na proces očkování, hlavně z hlediska disperzity grafitu a odeznívání očkovacího účinku, ale také na strukturu základní kovové hmoty po ztuhnutí, což má zase vliv na mechanické vlastnosti litiny – stejně jako chemické složení. Rychlým ochlazováním se omezují difuzně probíhající děje – potlačení eutektické grafitizace, takže se zvyšuje sklon litiny k metastabilnímu tuhnutí a také je podporován vznik perlitu. [2], [7], [12]

Veličinou vyjadřující dobu tuhnutí odlitku, která zahrnuje tloušťku jeho stěny a která je funkcí velikostí jeho objemu a povrchu, je tzv. modul odlitku:

$$M = \frac{V}{S} \quad (3.1)$$

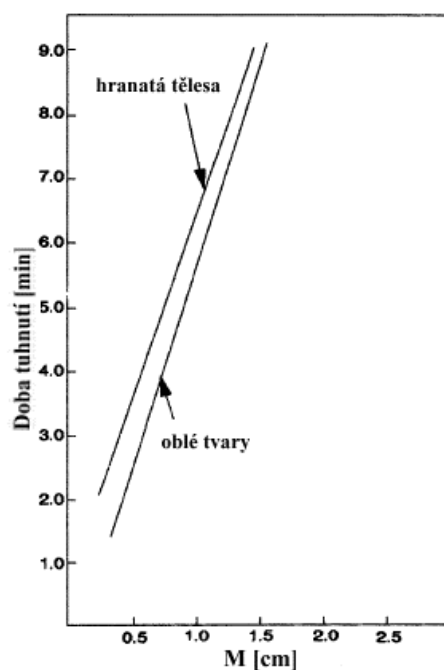
kde: M – modul [cm]

V – objem tělesa [cm³]

S – ochlazovaná plocha [cm²]. [7]

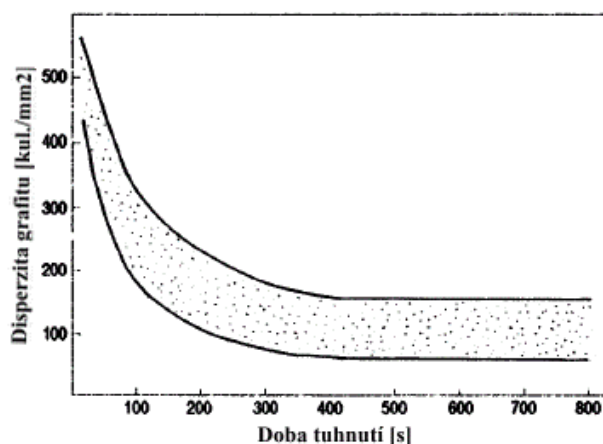
S klesajícím modulem se zvyšuje rychlost tuhnutí odlitků, tedy tenkostěnné odlitky tuhnou rychleji než odlitky silnostěnné. Nejrychleji tuhnou rohy a hrany odlitků, přičemž se v důsledku odvodu tepla do formovací směsi tuhnutí vnitřku tělesa zpomaluje. Platí, že zaoblené rohy a hrany částí odlitku, které by jinak měly rohy a hrany ostré, tuhnou při stejné hodnotě modulu rychleji (obr. 6). [7], [12]

Rychlost tuhnutí odlitku ovlivňuje kromě tloušťky stěny také lící teplota – vyšší teplota taveniny obvykle znamená delší dobu tuhnutí, pokud není brán v potaz odvod tepla z rozdílných formovacích směsí, resp. rozdílná teplota ve stejné formovací směsi. Plynulejšího ochlazování odlitku se dosáhne ohřátím formy, v důsledku toho se zajistí snížení teplotního spádu mezi taveninou a formou. Delší dobou tuhnutí je tedy možné zvýšit ve struktuře základní kovové hmoty množství feritu vyloučeného při tuhnutí. Tuhnutí, které probíhá při nižších teplotách (eutektické), tedy asi pod 1138 °C, má sklon k tvorbě karbidů – toho lze ovšem částečně nebo úplně zamezit řádným sekundárním očkováním. Velikost přechlazení, které je potřebné pro tuhnutí LKG, roste s rychlostí ochlazování. Určitému zamezení tvorby karbidů se také dosahuje zvýšením počtu nukleačních zárodků se zvyšujícím se přechlazením, neboť přitom roste rychlost nukleace. [7], [12]



Obr. 6: Závislost doby tuhnutí na modulu [12]

Rychlost tuhnutí má také vliv na disperzitu grafitu, resp. počet kuliček grafitu (obr. 7). Kratší doba tuhnutí tenčích stěn, resp. rychlejší odvod tepla z formy (kovové formy) má za následek zvýšení počtu kuliček grafitu. Naopak delší doba tuhnutí silnějších stěn formy, resp. pomalejší odvod tepla (pískové formy) snižuje disperzitu grafitu v kovové matici. Při tuhnutí silnostěnných odlitků dochází k mikrosegregaci prvků jako mangan, chrom nebo molybden, což dává za vznik intercelulárních karbidů a pórovitosti ve struktuře, které mají za následek zhoršení dynamických mechanických vlastností LKG, jako houževnatosti a meze únavy – tento fakt ovšem popřel Yeung [20], který ve své práci tvrdil, že k mikrosegregacím naopak dochází ve velmi tenkých průřezích (viz. kapitola 3.2). [7], [12]



Obr. 7: Vliv doby tuhnutí na disperzitu grafitu [12]

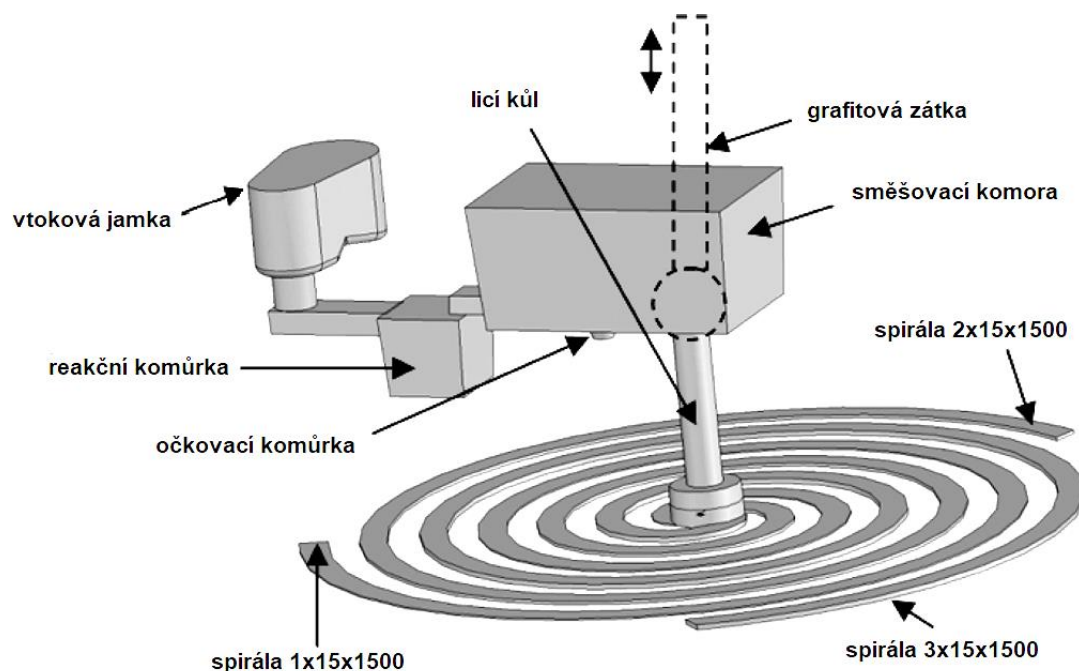
3.4 Experimentální metody tuhnutí tenkostěnných odlitků

Znalost a nastavení podmínek správného mechanismu tuhnutí tenkostěnných odlitků z LKG je základním předpokladem pro zajištění požadovaných mechanických vlastností. Faktory, které ovlivňují tuhnutí litiny jsou především tloušťka stěny odlitku, licí teplota, chemické složení, vliv feritotvorných a perlitotvorných prvků, způsob očkování, vývin plynů a tepelná akumulace formovací směsi. Problémem tuhnutí se ve svém výzkumu zabýval Górný [13], který zkoumal strukturu pomocí Archimédovy spirály, Yeung [10], který použil tenké horizontální zkušební destičky a Labrecque [14] destičky vertikální.

3.4.1 Archimédova spirála

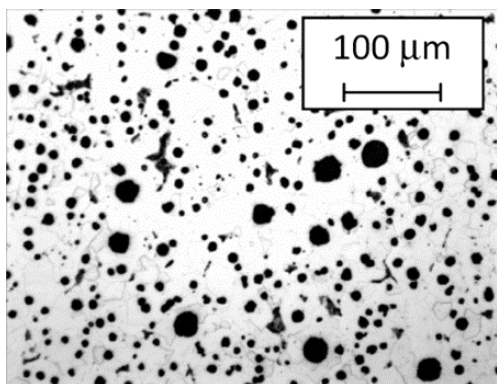
Archimédova spirála se ve slévárenství využívá zejména pro určení zabíhavosti odlévané taveniny. Je známo, že litina má oproti oceli zabíhavost výrazně lepší. Další možností, jak tento model využít, je pro zkoumání kinetiky tuhnutí a následného ověření mikrostruktury, neboť teplota taveniny a rychlost ochlazování hraje u tenkostěnných odlitků z tvárné litiny podstatnou roli. Již při samotném proudění taveniny ve formě dochází k výraznému odvodu tepla, což ovlivňuje jak zabíhavost, tak mikrostrukturu – počet kuliček a disperzita grafitu, procentuální zastoupení feritu a perlitu (případně také cementitu). [13]

Kompletní odlitek ve formě se skládá z Archimédovy spirály se třemi rameny a vtokové soustavy (obr. 8). Ramena mají všechna stejnou délku (1500 mm), šířku (15 mm), ale liší se v tloušťce (1, 2 a 3 mm). Vtoková soustava se skládá z licí jamky, reakční komůrky, směšovací komory s očkovací komůrkou, grafitové zátky a licího kůlu. Do reakční komory se umísťují modifikační a očkovací předslitiny. Úkolem směšovací komory je docílit správného promíchání taveniny po rozpuštění modifikační a očkovací předslitiny. Navíc je ve směšovací komoře zajištěno sekundární očkování. Ihned po jejím zaplnění se vysune grafitová zátka zabráňující okamžitému vtékání kovu do formy a tavenina začne plynule zaplňovat spirálu. Forma se může zhotovovat např. z chemicky vázaného křemenného písku. Nejvyšší zabíhavosti v Górného [13] experimentu dosáhla litina ve spirále s největším průřezem (tloušťka 3 mm) a sice 860 mm. [13]

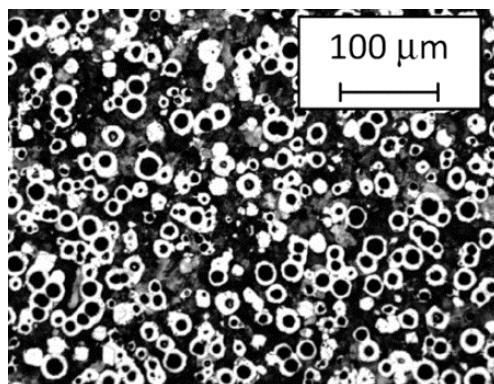


Obr. 8: Archimédova spirála [13]

Po ztuhnutí taveniny je možné z jakéhokoli místa spirály odebrat vzorek a v tomto daném místě zjistit mikrostrukturu, velikost, tvar a disperzitu grafitu. Zajímavé je pozorovat strukturu ve spirále s tloušťkou 3 mm (tloušťka stejná jako jedné z destiček v praktické části této diplomové práce). Ve vzdálenosti 10 mm od začátku ramena spirály je podíl feritu ve struktuře 95 %, disperzita eutektického grafitu 190 923 kul./mm³ a disperzita primárního grafitu 1 018 kul./mm³ (obr. 9). Naproti tomu v cca polovině zaběhnuté vzdálenosti, tj. 400 mm, je ferit ve struktuře zastoupen pouze z 25 %, disperzita eutektického grafitu je 246 544 kul./mm³ a disperzita primárního grafitu 3 067 kul./mm³ (obr. 10). Přítomnosti kuliček grafitu s velkým průměrem ve feritické struktuře naznačuje, že tyto částice nukleovaly ještě před dosažením eutektické teploty a měly tedy delší čas na růst. Protože je růst řízen difuzí, vyšší rychlost ochlazování má za následek vyšší disperzitu primárního grafitu, to znamená, že počet kuliček primárního grafitu se zvyšuje s rostoucí vzdáleností od licího kůlu (zvyšuje se rychlost ochlazování vlivem rychlejšího odvodu tepla z proudící taveniny). Vyšší disperzita primárního grafitu s rostoucí vzdáleností od licího kůlu ale také může být vlivem turbulentního proudění, kdy jsou částice primárního grafitu proudem taveniny unášeny. [13]



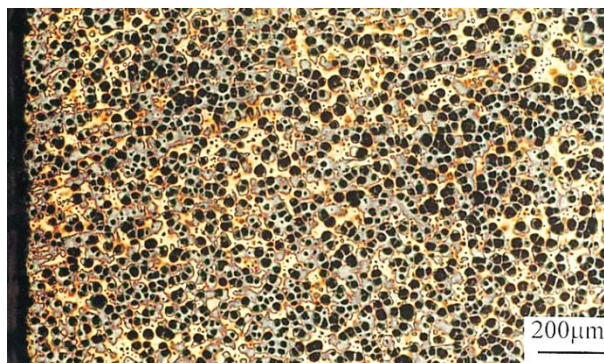
Obr. 9: Struktura ve vzdálenosti 10 mm [13]



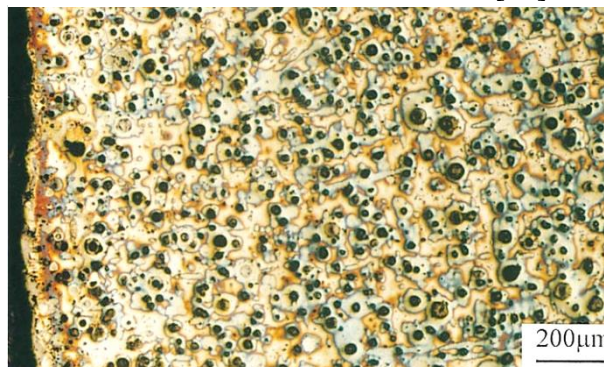
Obr. 10: Struktura ve vzdálenosti 400 mm [13]

3.4.2 Horizontální zkušební destičky

Do formy se zaformují modely horizontálních destiček, v tomto případě s délkou 100 mm, šířkou 40 mm a s tloušťkou stěny dle potřeby (3 mm). Pro barevnou metalografickou analýzu je nutné vzorek leptat činidlem, které na povrchu vytváří barevné odstíny. Na to může být použit leptací prostředek s chemickým složením 28 g hydroxidu sodného NaOH, 4 g hydroxidu draselného KOH, 4 g kyseliny pikrové $C_6H_3N_3O_7$ a 200 g destilované vody. Leptáním se na povrchu vzorku vytváří tenký film SiO_2 , který slouží jako rozkladač světla procházejícího skrze něj. Barvy pak závisí na tloušťce tohoto filmu, každá ze struktur vytváří tloušťku filmu jinou. Za předpokladu, že je dodržen jednotný čas leptání na celé části vzorku, pak tloušťka filmu závisí pouze na koncentraci křemíku v každé ze struktur. [10]



Obr. 11: Struktura v 3 mm stěně [10]

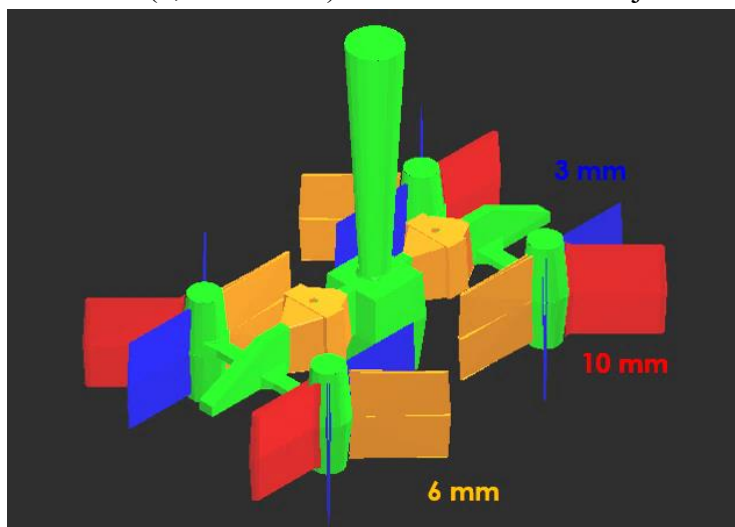


Obr. 12: Struktura v 10 mm stěně [10]

Zkoumáním barevné mikrostruktury s tloušťkou stěny 3 mm lze odlišit zelené primární dendrity austenitu vzniklé v dřívější fázi tuhnutí, černé kuličky grafitu obalené zelenými obálkami austenitu a žlutou mezidendritickou strukturu (obr. 11). Mikrostruktura vzorku s tloušťkou stěny 10 mm je barevně stejná jako předchozí, nicméně dendritů je zde méně a jsou kratší (obr. 12). [10]

3.4.3 Vertikální zkušební destičky

Model je navrhnut tak, aby co nejvíce kopíroval reálné odlévání ve slévárnách (obr. 13). Skládá se z lícího kůlu, očkovací komůrky, ze které vybíhají pod úhlem 180° dva rozváděcí kanály, ve kterých jsou přichystané známky na případné založení keramických filtrů. Z konce každého rozváděcího kanálu odbočují opět pod úhlem 180° dvě ramena, každé je na jejich konci opatřeno komorou válcového průřezu. Z tohoto válcového „nálitku“ vyčnívají do prostoru už samotné vertikálně uložené destičky. Destičky jsou každá stejně vysoké (85 mm) i dlouhé (80 mm), liší se pouze tloušťkou (3, 6 a 10 mm). Tato tloušťka není stejná v celém průřezu, neboť



Obr. 13: Vertikální zkušební destičky [14]

středem destiček prochází dělicí rovina. Proto jsou destičky v horní i spodní části formy opatřeny úkosy – 1° při 3 mm tloušťce a 2° při tloušťce 6 mm a 10 mm. [14]

Na tomto modelu se výhodně zjišťuje vliv sekundárního očkovaní, který Labrecque [14] provedl. Např. první tavba byla očkována pouze primárně blíže neurčenou ponořovací metodou, naproti tomu tavba druhá byla doplněna ještě sekundárním očkováním pomocí očkovacího tělíska s vedoucím obsahem bismutu. Obě tavby měly velmi podobný uhlíkový ekvivalent (rozdíl 0,05). Při použití sekundárního očkovaní nevykazovaly žádné destičky přítomnost karbidů (zákalů), na rozdíl od první tavby s pouhým primárním očkováním. Patrný byl také rozdíl v disperzitě grafitu – první tavba měla průměrně 427 kul./mm^2 (3 mm tloušťka) a 96 kul./mm^2 (10 mm tloušťka), zatímco druhá tavba se sekundárním očkováním vykazovala cca 1300 kul./mm^2 (3 mm tloušťka) a 653 kul./mm^2 (10 mm tloušťka). Z těchto výsledků je patrný vliv tloušťky stěny, rozdílné doby tuhnutí a vliv sekundárního očkovaní při stejné formovací směsi v celé formě na disperzitu grafitu a také jeho velikost. [14]

Co se týče struktury, vlivem velmi rychlého odvodu tepla z 3 mm destiček, je jejich struktura více perlitická než struktura tlustších vzorků. Platí ale, že s rostoucím obsahem křemíku klesá podíl perlitu ve struktuře, a naopak roste podíl feritu, nehledě na tloušťku stěny. Vyšší ochlazovací účinek v 3 mm destičkách zabraňuje difuzi uhlíku do kuliček grafitu během eutektoidní transformace. Křemík také do jisté míry ovlivňuje podíl zákalů ve struktuře, která se vyskytuje na horních a spodních koncích destiček, neboť je zde jejich šířka vlivem úkosů menší – u 3 mm destiček je to asi 1,5 mm. Při podstatném zvýšení obsahu křemíku v tavenině dojde k poklesu podílu zákalů právě na těchto koncích destiček. [14]

3.5 Vliv rychlosti ochlazování

Struktura základní kovové hmoty je mimo jiné závislá na rychlosti ochlazování – vyšší rychlost způsobuje při eutektoidní austenitické transformaci vylučování perlitu ve struktuře, naopak za nižších rychlostí dochází k vylučování feritu. Ochlazování taveniny je závislé na tloušťce stěny odlitku, ale také na jejím množství ve formě po nalití a množství a druhu formovací směsi. S rostoucí hmotností taveniny ve formě se zvyšuje teplota formy a podíl tepelně ovlivněné formovací směsi. Toto teplo, které se takto déle udržuje, má za následek prodloužení doby tuhnutí. V důsledku toho je nižší rychlost ochlazování taveniny a ve struktuře tak bude vyšší podíl feritu. [7], [12]

Je potřeba nezaměňovat pojmy rychlost tuhnutí a rychlost ochlazování. Oba tyto jevy dávají možnosti kombinované krystalizace taveniny. První variantou tuhnutí může být kombinace vyšší rychlosti ochlazování a rychlého tuhnutí tekutého kovu za vzniku vyššího podílu perlitické struktury nebo rychlého tuhnutí tentokrát při nižší rychlosti ochlazování, přičemž v tomto případě se podíl perlitu ve struktuře sníží. Druhou variantou je pomalé tuhnutí při vysoké rychlosti ochlazování, kdy je podíl perlitu ve struktuře vyšší než při stejně nízké rychlosti tuhnutí ovšem za nižší rychlosti ochlazování. Příkladem těchto variant může být skořepinová forma zasypaná dostatečným množstvím ostřiva – i při relativně rychlém tuhnutí je možné dosáhnout ve struktuře nižšího podílu perlitu, a tedy vyššího podílu feritu než bez obsypání skořepiny, neboť rychlost ochlazování je nižší. [7], [12]

3.6 Vliv tloušťky stěny na mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti odlitků z LKG závisí především na struktuře základní kovové hmoty, chemickém složení, velikosti, tvaru a disperzitě grafitu, ale také na teplotě. Tyto faktory jsou ale závislé na tloušťce stěny. Obvykle se zkoumají následující mechanické vlastnosti: pevnost (mez pevnosti R_m , smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$), plastické vlastnosti (tažnost A), dynamické vlastnosti (nárazová práce s V-vrubem KV) a tvrdost (HBW). [2], [7]

Vlivem velmi tenkých průřezů stěn tenkostěnných odlitků je tuhnutí roztaveného kovu rychlejší, čímž se zvyšuje disperzita grafitu a zároveň se snižuje průměr těchto kuliček. Při velkém přechlazení je riziko vzniku zákalky hlavně na rozích a hranách odlitků. Tyto karbidy jsou v grafitické litině nežádoucí, neboť sice zvyšují její tvrdost, ovšem zásadně snižují tažnost a zvyšují křehkost. Z tohoto důvodu je důležité mít dostatečně zajištěné očkování a nejlépe použít sekundárního očkování, např. do proudu kovu při odlévání těsně nad formou. Vznik karbidů lze ovšem také z části eliminovat delší dobou ochlazování a vyšším obsahem křemíku. Mechanické vlastnosti se ovlivňují zejména chemickým složením, kdy jsou podle potřeby do taveniny přidávány feritotvorné (Si), resp. perlitotvorné prvky (Mn, Cu, Sn). S rostoucí tloušťkou stěny pozvolna klesá pevnost a tvrdost, naopak se zvyšuje tažnost – to je způsobeno vylučováním vyššího podílu feritu ve struktuře. Bylo také vyzorováno, že se snižují únavové vlastnosti litiny, a to v důsledku snížení disperzity grafitu a možnému výskytu mikrosegregací legujících prvků v intercelulárních prostorech. [7], [12]

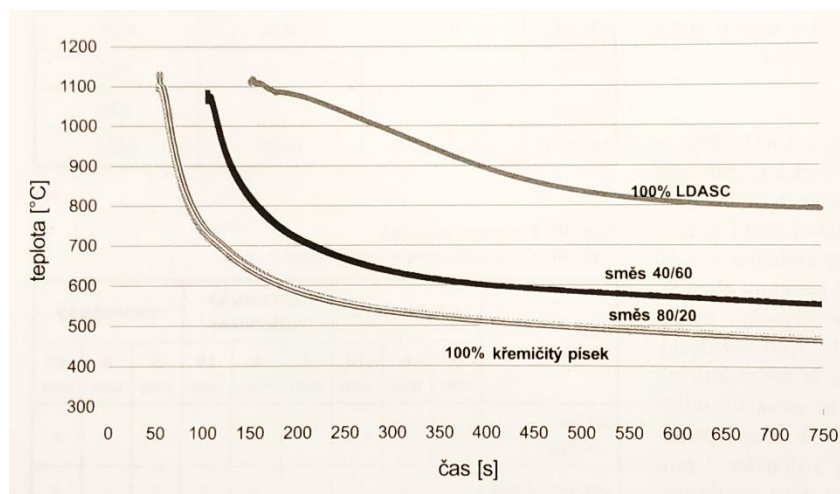
3.7 Zásady výroby tenkostěnných odlitků z LKG

Výroba tenkostěnných odlitků z tvárné litiny, tj. odlitků s tloušťkou stěn maximálně 10-15 mm a méně, má svoje určitá specifika. Hodnotu uhlíkového ekvivalentu je nutno zvětšovat se snižující se tloušťkou stěny, tedy zajistit, aby byla litina i díky vysokému přechlazení pod rovnovážnou eutektickou teplotou stále nadeutektická. Vlivem přechlazení se posunuje eutektický bod v rovnovážném diagramu Fe-C (CE = 4,25) dolů a doprava, takže je nutné zajistit dostatečně vysokou hodnotu uhlíkového ekvivalentu CE tak, aby ve struktuře právě vlivem přechlazení nevznikal primární austenit. Ovšem příliš vysoká hodnota může vést k nižší tekutosti taveniny a hrozí riziko nezaběhnutí kovu do nejtenčích průřezů. Lící teplota se má pohybovat asi okolo 1430 °C nebo výše a obsah zbytkového hořčíku po modifikaci je vzhledem k velmi rychlému tuhnutí a tím sklonu k tvorbě karbidů nutno udržovat na spodní hranici, ale ještě takové, aby vznikl dokonale kuličkový grafit, tedy asi 0,025-0,035 % Mg. Stejně tak zajistit co možná nejnížší nutný obsah dalších karbidotvorných prvků, jako jsou mangan, chrom, vanad, molybden apod, resp. tyto prvky do taveniny, pokud to není nutné, nepřidávat. Je přímo žádoucí taveninu sekundárně očkovat, nejlépe tedy do proudu kovu při samotném odlévání nebo pomocí očkovacích tělísek uvnitř formy. [7]

3.7.1 Izolační formovací hmoty

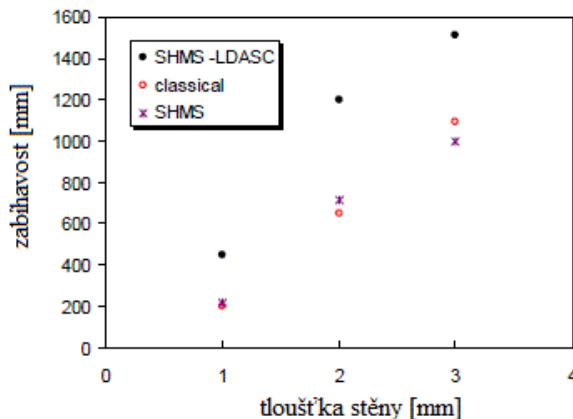
Pouze metalurgickými a technologickými úpravami nelze zcela zajistit bezvadnou výrobu tenkostěnných odlitků z LKG. Z tohoto důvodu je nutné brát zřetel na formovací směs, ze které má být zhotovena forma. Nejčastěji používaná křemičitá formovací směs se velmi rychle prohřeje a má tedy vyšší ochlazovací účinek (nikoliv tak vysoký jako kovová forma) a nedisponuje dostatečnou tepelnou izolací. Ostřivem s velmi vysokou schopností izolovat teplo, snížit rychlost ochlazování a výrazně tak prodloužit dobu tuhnutí je směs s označením LDASC (Low Density Alumina Silica Ceramic). Chemické složení tohoto ostřiva je 25-45 % Al_2O_3 a 55-75 % SiO_2 . Takto lehčené ostřivo je charakteristické nízkou hustotou ($0,35\text{-}0,45 \text{ g.cm}^{-3}$), zrnitostí od 10 do 350 μm a schopností absorbovat teplo ($0,018\text{-}0,03 \text{ J.cm}^{-2}.\text{s}^{-0,5}.\text{°C}^{-1}$). Směs LDASC je kombinací křemenného ostřiva s podílem keramických křemičitanů hlinitých. V praxi je možné kombinovat klasickou křemennou formovací směs s LDASC, přičemž zastoupení izolační směsi se může pohybovat od 20 do 100 %. Zaformováním modelu do této izolační formovací směsi se docílí nižší rychlosti odvodu tepla a tuhnutí taveniny, což je u výroby tenkostěnných odlitků zásadní přínos. Prodloužením doby tuhnutí bude ovlivněn také podíl feritu a perlitu ve struktuře – předpokládá se, že matrice bude více feritická. Otáhal [8] uvádí, že vliv cca 40 % obsahu LDASC ve formovací směsi je ještě zanedbatelný vzhledem k rychlosti ochlazování destiček s tloušťkou 3 mm. Podstatné zvýšení efektu dochází asi od 60 % LDASC, kdy se výrazně prodlužuje doba tuhnutí vlivem nižší rychlosti odvodu tepla z tekutého kovu (obr. 14). Například při provedeném pokusu byla struktura destičky o tloušťce

3 mm zaformovaná do formovací směsi o 100 % obsahu LDASC čistě feritická. Za normálních okolností, pokud by takto tenká destička byla zaformována do formovací směsi se 100 % obsahem křemičitého písku, by byla struktura feriticko-perlitická, pravděpodobně s vyšším podílem perlitu. To by znamenalo vyšší hodnoty mechanických vlastností, ovšem také vyšší riziko tvorby karbidů. [7], [15], [16]



Obr. 14: Vliv podílu LDASC v ostřivu na průběh ochlazování [16]

Vlivem LDASC na strukturu a zabíhavost LKG se ve svém výzkumu zabýval také Górný [15]. Vlivem nízké rychlosti odvodu tepla a s rostoucí tloušťkou stěny se zabíhavost zvyšuje (obr. 15), mění se také struktura základní kovové hmoty. Zabíhavost byla zjišťována na Archimedově spirále pro tři formovací směsi – první byla klasický křemenný písek pojený bentonitem (*classical*), druhá samotvrdnoucí křemenná směs vytvrzená pryskyřicí a aktivátorem (*SHMS*) a třetí samotvrdnoucí směs s podílem LDASC vytvrzená stejnou pryskyřicí i aktivátorem (*SHMS-LDASC*). Průřezy jednotlivých ramen spirály byly 1x15 mm, 2x15 mm a 3x15 mm. Zabíhavost prvních dvou formovacích směsí byla ve všech ramenech velmi podobná, ovšem patrný rozdíl nastal při použití směsi LDASC, kdy zabíhavost litiny rapidně vzrostla, a to díky izolační schopnosti formovací směsi. Potvrdilo se, že struktura litiny ze směsi LDASC byla vlivem pomalejší rychlosti tuhnutí více feritická, s nižší disperzitou grafitu, s větším průměrem kuliček grafitu a s žádným nebo minimálním zastoupením cementitu ve struktuře. [15]



Obr. 15: Vliv odvodu tepla na zabíhavost [15]

V praxi se formovací směs LDASC využívá při výrobě tenkostěnných odlitků z austenitické litiny s kuličkovým grafitem (Ni-resist) nebo z izotermicky zušlechťené LKG (ADI litina). U odlitků určených k izotermickému zušlechťování se musí legováním zvýšit vytvrditelnost, to proto, aby nedošlo k feriticko-perlitické transformaci. Vyšší vytvrditelnosti se dosahuje legováním prvky jako jsou chrom, nikl nebo molybden. S klesající tloušťkou stěn odlitku se ovšem požadované koncentrace legujících prvků snižují a při extrémních tloušťkách, např. 3 mm, se legovat nemusí vůbec. Vzhledem k vysokým mechanickým vlastnostem těchto druhů litin je možné těmito odlitky nahrazovat lehké odlitky ze slitin hliníku a hořčíku s nižšími náklady na výrobu, např. hliníkový náboj kola u kamionu (hmotnost snížena o 2 % a cena o 25 %) nebo výfukové potrubí (Ni-resist). [7]

3.7.2 Vysoká disperzita grafitu

Při výrobě odlitků z tvárné litiny s velmi tenkými stěnami chceme, aby byla jejich struktura spíše feritická, resp. feriticko-perlitická. Feritickou maticí je možné podpořit vyšší disperzitou grafitu, tedy řádným naočkováním taveniny, nebo vyšším obsahem křemíku. Se zvyšujícím se obsahem křemíku se bez ohledu na tloušťku stěny zvyšuje obsah feritu ve struktuře. Disperzita kuličkového grafitu vyjadřuje počet kuliček na 1 mm^2 a tím nepřímo ovlivňuje mechanické vlastnosti litiny, nicméně ne tolik jako tvar vyloučeného grafitu. Názorným příkladem vlivu tvaru grafitu na mechanické vlastnosti může být rozdíl mezi LLG a LKG při stejné hodnotě disperzity – lupínky grafitu působí více jako vruby než kuličky, pro by měla LKG vyšší hodnoty pevnosti, tvrdosti i tažnosti než LLG. Vysoká disperzita grafitu určuje tzv. metalurgickou kvalitu kovu. [2], [16], [17], [18]

U tenkostěnných odlitků se vlivem rychlejšího ochlazování dosahuje vyšších hodnot disperzity grafitu než u odlitků silnostěnných – kuličky mají menší průměr a je jich více, při normální rychlosti tuhnutí mají větší průměr, ale zato je jich méně. Při vysoké disperzitě grafitu jsou kuličky blízko sebe a toho lze docílit důkladným očkováním, tedy zajištěním vysokého počtu nukleačních zárodků v tavenině. Při difuzi uhlíku z taveniny skrz obálku austenitu jsou u tenkostěnných odlitků krátké difuzní vzdálenosti (vlivem vysoké disperzity). Kolem každé kuličky grafitu se pak při austenitické přeměně tvoří obálka feritu. Je ale možné, že vlivem vysoké rychlosti ochlazování nestihl všechny uhlík takto difundovat do grafitu a v těchto místech pak vznikne perlit, který se skládá z destiček feritu a perlitického cementitu. V extrémním případě nevzniká ve struktuře už ani perlit, ale cementit. Z tohoto důvodu je nutné vhodně zvolit očkovací metodu a dostat do taveniny co nejvíce aktivních látek, které napomáhají vzniku vysokého počtu nukleačních zárodků a tím zvyšují disperzitu vylučovaného grafitu. [2], [17], [18]

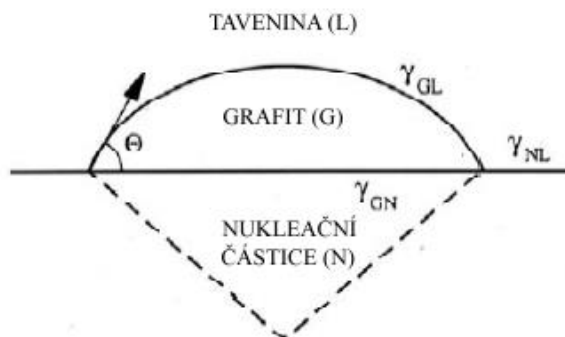
Pokud disperzita takto ovlivňuje obsah feritu a perlitu ve struktuře, tak s vyšší disperzitou se bude snižovat pevnost v důsledku vyššího podílu feritu ve struktuře, naopak se bude zvyšovat tažnost. Vysoká disperzita grafitu také zabraňuje vylučování cementitu, tedy tvorbě zákalky, a zlepšuje homogenitu kovové matrice čímž snižuje riziko mikrosegregací prvků, které by následně mohly způsobovat vznik intercelulárních karbidů nebo degeneraci grafitu. Dalším pozitivním účinkem vysoké disperzity je vznik kuliček grafitu o menším průměru, které nepůsobí tolik jako vruby a tolik tím nenarušují základní kovovou hmotu a díky tomu nepřímo zvyšují mechanické vlastnosti jako pevnost a tvrdost. Vysoká disperzita je také spojována s lepší nodularitou, tzn. kuličky grafitu se tvarem více blíží tvaru dokonalé koule – jejich vrubový účinek na základní kovovou hmotu bude tedy co nejmenší, proto se vysokou nodularitou dosahuje vyšších hodnot mechanických vlastností. Hodnota disperzity grafitu je v praxi určována buď obrazovou analýzou nebo pomocí normovaných etalonů – v obou těchto případech je potřeba odebrat vzorek a udělat metalografický výbrus. [2], [11], [17], [18]

4 GRAFITIZACE A OČKOVÁNÍ

Grafitické očkování LKG je důležitá technologická operace jejímž hlavním cílem je přivést do taveniny aktivní prvky, které spolu s prvky již přítomnými v roztavené litině dají vzniku ideálního počtu vhodných grafitizačních zárodků tak, aby byl při eutektické krystalizaci litiny co možná nejvíce potlačen sklon ke karbidickému (metastabilnímu) tuhnutí – vzniku ledeburitu. Význam očkování je tedy tím vyšší, čím tenčí je stěna vyráběného odlitku, tedy při rychlém ochlazování taveniny a také při odlévání s vysokým ochlazovacím účinkem formy (rychlým odvodem tepla). Vyšší počet takto vzniklých aktivních zárodků má za následek zlepšení podmínek nukleace a růstu grafitu. Taktéž se má správným očkováním vhodně zvýšit počet eutektických buněk, tj. oblastí připadající jedné kuličce grafitu, a disperzita grafitu, tzn. jemnozrná struktura v celém průřezu odlitku, díky čemuž se dosahuje vyšších hodnot mechanických vlastností – tvrdost, smluvní mez kluzu, mez pevnosti, tažnost, mez únavy atd. Vhodný tvar, počet a velikost kuliček grafitu (morfologie grafitu) je jeden z hlavních bodů správného očkování. Jemnozrný grafit způsobí zvýšení podílu feritu ve struktuře při perlitické transformaci, což vede ke zvýšení plastických vlastností LKG (tažnosti). Ovšem tak jako v řadě jiných věcí, i tady nastává problém, a sice, pokud je disperzita grafitu až příliš vysoká – je tedy také příliš vysoký počet eutektických buněk – tuhne litina spíše endogenně, tzv. kašovitě v celém průřezu. Takovéto tuhnutí je pak velmi náchylné na vznik pórovitosti a ředin. Při výrobě LKG je očkování nezbytné, neboť zbytkový hořčík obsažený v tavenině působí karbidotvorně, zvyšuje tedy sklon k metastabilnímu tuhnutí, a právě očkováním se chceme takovému tuhnutí taveniny vyhnout. [2], [7], [19], [20]

4.1 Heterogenní nukleace

Nukleace je proces vytvoření zárodků, na kterých je pak možný následný růst nových fází. Samotnou nukleaci lze rozdělit na homogenní a heterogenní. Homogenní nukleace je velmi energeticky náročná a je při ní potřeba vysokého přechlazení. Litina s kuličkovým grafitem tuhne výhradně mechanismem heterogenní nukleace, tzn. k nukleaci zárodků se používají částice záměrně přidávané do taveniny (aktivní prvky v očkovadlech) nebo cizí částice již v tavenině obsažené (vměstky), které snižují energii potřebnou k vytvoření mezifázového rozhraní, přičemž není potřeba vysokého přechlazení. Vhodný nukleační zárodek je v tavenině smáčivý, mezi ním a taveninou je nízké mezifázové napětí. Pokud dochází vlivem tenkostěnných průřezů k rychlému ochlazování, tedy také k vyššímu přechlazení, aktivuje se větší počet menších zárodků a tím vzniká jemnozrnější struktura. Nižším přechlazením, např. při nižších rychlostech ochlazování, by byly aktivovány pouze větší zárodky a struktura základní kovové hmoty by byla hrubozrnější. [2], [7]



Obr. 16: Model heterogenní nukleace [21]

Model heterogenní nukleace grafitu (obr. 16) je popsán energiemi na mezifázovém rozhraní grafit-nukleační částice γ_{GN} , grafit-tavenina γ_{GL} a nukleační částice-tavenina γ_{NL} a úhlem

smáčení mezi zárodkem a taveninou θ . Potom existuje vztah mezi těmito třemi rozhraními, a sice:

$$\gamma_{GL} \cdot \cos \theta + \gamma_{GN} = \gamma_{NL} \quad (4.1)$$

Celková změna Gibbsovy energie pro model heterogenní nukleace zárodku grafitu na rovné ploše s kulovým vrchlíkem je dána rovnicí:

$$\Delta G = f(\theta) \cdot \left(-\frac{4}{3} \pi r^3 \cdot \Delta G_V + 4 \pi r^2 \cdot \gamma_{GL} \right) \quad (4.2)$$

kde ΔG_V je energie uvolňovaná při tuhnutí, r je poloměr zárodku a $f(\theta)$ je tzv. tvarový faktor (tvarová funkce) definovaný jako:

$$f(\theta) = \frac{(2 + \cos \theta) \cdot (1 - \cos \theta)^2}{4} \quad (4.3)$$

Energie uvolňovaná při tuhnutí ΔG_V závisí na přechlazení pod krystalizační rovnovážnou teplotou a je dána rovnicí:

$$\Delta G_V = L \cdot \frac{T_{kr} - T}{T_{kr}} \quad (4.4)$$

kde L je latentní teplo uvolňované při krystalizaci, T_{kr} je rovnovážná teplota krystalizace a T je skutečná teplota. Odvození kritického poloměru stabilního zárodku vznikne zderivováním rovnice 4.2 podle r a položením rovno nule, tedy:

$$r = -\frac{2\gamma_{GL} \cdot \sin \theta}{\Delta G_V} \quad (4.5)$$

Hodnota tvarového faktoru $f(\theta)$ se pohybuje v uzavřeném intervalu $<0;1>$. Pro $f(\theta) = 0$ je úhel smáčení $\theta = 0^\circ$ a to znamená dokonalé smáčení nukleační částice taveninou. Pro $f(\theta) = 1$ je úhel smáčení $\theta = 180^\circ$, což znamená dokonale nesmáčivý povrch – díky tomu krystalizuje tavenina principem homogenní nukleace. [2], [12], [21]

4.2 Teorie nukleačních mechanismů grafitu

Teorie plynových bublin – Podle této teorie má grafit tendenci krystalizovat na jakémkoliv povrchu nebo vadě vyskytující se v tavenině, ovšem za předpokladu, že je obalen bublinou plynu oxidu uhelnatého. Do taveniny jsou ovšem postupně při výrobě LKG přidávány prvky, které mají vysokou afinitu ke kyslíku (Mg, Ca, KVZ apod.), jsou to tedy velmi silná dezoxidovadla schopná navázat samotný kyslík z taveniny, ale také ho vyvázat z molekul CO a tím je rozložit. Proto je výskyt bublin oxidu uhelnatého v LKG velmi nepravděpodobný. Mimo oxid uhelnatý se v tavenině nacházejí také jiné plyny, např. vodík a dusík, které ovšem nejčastěji způsobují pouze vady. Je také velmi nepravděpodobné, že by grafit nukleoal a rostl v celém objemu plynové bubliny. Při běžných podmínkách by neexistovala žádná síla potřebná k difuzi uhlíku do plynové bubliny skrz již ztuhlý grafit. [21], [22]

Grafitová teorie – Jedna z prvních teorií o heterogenní nukleaci grafitu v tavenině byla založena na předpokladu, že k nukleaci zárodků grafitu dochází na jiné již existující částici grafitu. Dále se předpokládalo, že účinnost očkovačů na bázi křemíku je značně snížena v důsledku vzniku oblastí bohatých na křemík s nízkou rozpustností uhlíku, zde by tedy k nukleaci docházet nemělo. Tento předpoklad byl ovšem později vyvrácen, neboť rozpouštění ferosilicia v tavenině trvá řádově několik sekund – grafit má pak tendenci nukleoovat na rozhraní mezi rozpouštějícími se částicemi a taveninou. Nauhličovadla jsou typicky přidávány do taveniny o zrnitosti několika milimetrů a rozpouštějí se velmi rychle, a to v řádech jednotek až desítek sekund. V tuhnoucí tavenině by vhodná velikost nukleačních grafitových zárodků byla v řádech mikrometrů a bylo by to velmi výhodné, neboť kde by lépe grafit nukleoal a rostl než

právě na grafitu. Ovšem částice o velikosti několika mikrometrů by se v tavenině rozpustila opravdu velmi rychle, k žádné nukleaci a růstu by tedy nedošlo. [21], [22]

Teorie o karbidu křemíku – Bylo pozorováno, že krystaly karbidů křemíku a částice grafitu se v tavenině formují vedle rozpouštějících se částic ferosilicia, a to také zejména po procesu očkovaní. Hlavním předpokladem této teorie je existence nehomogenního rozložení (lokálního přesycení) uhlíku a křemíku v tavenině po rozpuštění SiC, které představuje potřebnou hnací sílu procesu homogenní nukleace grafitu. Touto teorií by se také vysvětloval odeznívací účinek očkovaní související s homogenizací taveniny difuzí uhlíku a křemíku. Prvním nedostatkem této teorie je, že není schopna vysvětlit zásadní roli aktivních prvků v očkovacích předslutinách, jakými jsou vápník, stroncium nebo baryum. Dalším je předpoklad, že uhlík a křemík vytvářejí v tavenině nehomogenní oblasti s lokálním přesycením – oba tyto prvky mají naopak vysokou difuzivitu a v důsledku toho jsou v tavenině dobře a rovnoměrně rozpuštěné. Je tedy velmi nepravděpodobné, že by rozpouštěním SiC vznikaly v tavenině oblasti přesycené uhlíkem a křemíkem po celou dobu tavení a následném odlití a ztuhnutí taveniny. [21], [22]

Teorie karbidů – Tato teorie předpokládá jak homogenní, tak heterogenní nukleaci grafitu v tavenině. Prvky jako vápník, stroncium a baryum vytvářejí karbidy typu XC_2 , a protože mají podobnou mřížku jako grafit, je pro ně výhodné nukleovat právě na těchto částicích, a to již při malém přechlazení. Výše zmíněné prvky ovšem přednostně reagují s kyslíkem a sírou a vytvářejí s nimi oxidy a sulfidy, které jsou daleko stabilnější než karbidy, které by tyto prvky tvořily s uhlíkem. [21], [22]

Teorie oxidů a sulfidů – Podrobným zkoumáním bylo postupně zjištěno, že nukleace grafitu nastává v tavenině především na oxidech, sulfidech a nitrídech, které vznikají po procesu očkovaní, ale také po modifikaci předslutinou FeSiMg, neboť hořčík se na vzniku těchto sloučenin také významně podílí. V podstatě jsou to nekovové vměstky, na kterých díky jejich podobné mřížce nukleuje a roste kuličkový grafit. Nukleační zárodky, které takto vznikají, mají jádro tvořené sulfidy a slupku kolem jádra, která je tvořena převážně oxidy. Sulfidy v jádru tvoří nejčastěji prvky jako Mg, Ca, Sr a v oxidickém jádru se nacházejí prvky Mg, Al, Si, Ti. Typická velikost těchto částic se pohybuje asi kolem 1 μm . [21], [22]

Teorie křemičitanů – Byl proveden výzkum (Skaland, 1993) zaměřený na heterogenní nukleaci grafitu na sloučeninách (vměstkách). Ukázalo se, že většina těchto sloučenin v LKG (MgS, CaS, MgO.SiO₂, 2MgO.SiO₂) vzniká po procesu modifikace. Naočkováním takovéto litiny předslutinami FeSi s prvky jako Ca, Sr, Ba, Al vznikají v tavenině křemičitany těchto prvků (XO.SiO₂, XO.Al₂O₃.2SiO₂) s hexagonální mřížkou, které se následně vážají na povrch sloučenin vzniklých po modifikaci. Protože má grafit stejnou hexagonální mřížku, je pro něj při tuhnutí výhodné nukleovat právě na takto vzniklých inkluzích. Jejich přítomnost v tavenině rozšiřuje nukleační potenciál grafitu. Výpis inkluzí vhodných pro vznik nukleačních zárodků zachycuje následující tabulka (tab. 2). [21], [22]

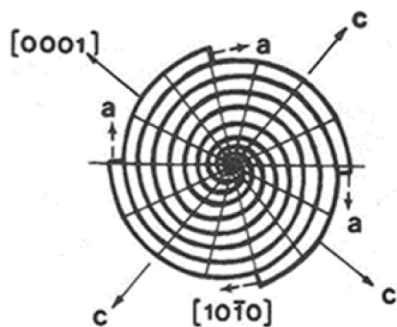
Tab. 2: Sloučeniny vhodné pro vznik nukleačních zárodků grafitu [21]

Sulfidy	MgS, CaS, SrS, CeS, LaS, BaS
Karbidy	CaC ₂ , SrC ₂ , BaC ₂
Oxidy	MgO, CaO, SrO, BaO
Křemičitany	XO-SiO ₂ , XO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ (X = Mg, Ca, Sr, Ba)
Nitridy	MgSiN ₂ , Mg ₃ N ₂ , Mg ₂ ,5AlSi ₂ ,5N ₆

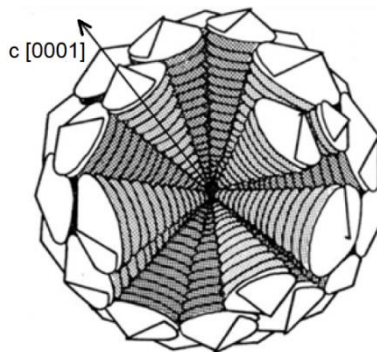
4.3 Růst grafitu

Existuje několik teorií, které se snaží vysvětlit princip globulitizace grafitu. Dá se předpokládat, že grafit roste obvodově ve spirálách sbalováním lamel (obr. 17). Je také možné, že přidáním některého ze známých modifikačních prvků do taveniny dojde v průběhu

krystalizace k zvýšení povrchového napětí na rozhraní tavenina-grafit a tím se zapříčiní vylučování grafitu v energeticky nejvýhodnějším tvaru s nejmenším povrchem, tedy kuličkou. Pravděpodobně se tak děje nepřímo, neboť přidáváním modifikačních látek do taveniny se vážou prvky snižující povrchové napětí – kyslík a síra. Další teorie pak pracuje s tím, že se modifikační prvky koncentrují na mezifázovém rozhraní, kde blokují růst v prizmových rovinách (směr „a“), díky čemuž je pak růst grafitu možný pouze v bazálních rovinách (směr „c“) tzv. mechanismem šroubových dislokací (obr. 18). [2], [23], [24]

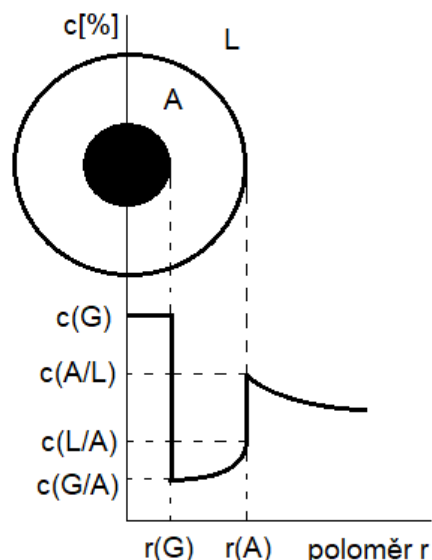


Obr. 17: Obvodový růst [24]

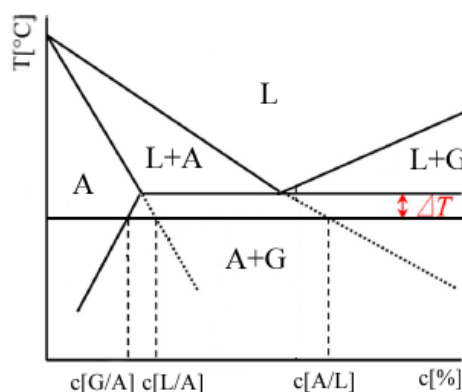


Obr. 18: Mechanismus šroubových dislokací [24]

V zásadě se dá předpokládat, že při tuhnutí má austenit tendenci růst kolem kuličkového grafitu, s nímž se spojí a vytvoří kolem něj obálku, neboť je v těchto místech tavenina ochuzená o uhlík, který už stačil difundovat do vzniklé kuličky grafitu. Zbýlý uhlík pak difunduje skrz tuto obálku, díky čemuž roste grafit uvnitř (obr. 19). Pod rovnovážnou eutektickou teplotou se díky přechlazení vytvoří koncentrační gradienty uhlíku a díky tomu dochází k difuzi uhlíku a následnému růstu grafitu v obálce austenitu (obr. 20). Objem této austenitické obálky závisí na velikosti rychlosti ochlazování. Vysoká rychlost ochlazování taveniny zvyšuje ztrátu uhlíku kolem grafitu a tím se zrychluje nukleace a růst austenitu. Tím se docílí vyššího počtu grafiticko-austenitických buněk, neboť na difuzi uhlíku do velkých vzdáleností není čas, takže se vytvoří struktura s vyšším počtem kuliček. Je-li ovšem rychlost tuhnutí až příliš vysoká, difuze uhlíku skrz obálku austenitu je potlačena, neboť nestačí na přechod atomů uhlíku z taveniny, a v důsledku toho vzniká ve zbytku taveniny jehlicový ledeburit. Naopak při nízkých rychlostech ochlazování má uhlík spoustu času difundovat i do větších vzdáleností – narostou také obálky austenitu, proto při pomalém tuhnutí vzniká struktura s nižším počtem kuliček grafitu, které jsou také objemově větší. [2], [7], [21], [25]



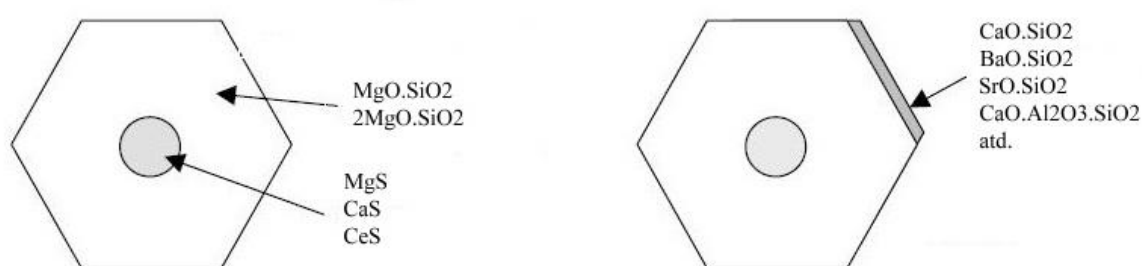
Obr. 19: Difuze C skrz obálku aust. [2]



Obr. 20: Přechlazení pod rovnovážnou eutektickou teplotou [26]

4.4 Vznik vhodných krystalizačních zárodků

Očkovací předslitina se skládá z nosiče a aktivní složky. Nosičem je nejčastěji předslitina FeSi (45-75 % Si) a aktivními složkami jsou prvky jako vápník, hliník, stroncium, baryum nebo zirkonium. Ferosilicium v tomto případě nemá očkovací funkci, pouze se díky němu do taveniny dostávají aktivní prvky, které naopak tuto funkci mají. Po přidání očkovadla do taveniny začnou tyto prvky reagovat především se sírou a kyslíkem již obsaženými v tavenině a začnou spolu tvořit sloučeniny, které následně obalují jádra krystalizačních zárodků, a protože mají hexagonální mřížku, je pro grafit se stejnou mřížkou výhodné začít se nukleovat právě na nich. Jádra zárodků jsou tvořena zejména sulfidy MgS, CaS nebo CeS, které jsou přítomné v tavenině již po modifikaci. Kolem těchto jader je vrstva oxidů $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$, resp. $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$, a právě na tuto vrstvu se začnou nabalovat oxidy vzniklé po přidání aktivních prvků do taveniny, např. $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $\text{BaO} \cdot \text{SiO}_2$, $\text{SrO} \cdot \text{SiO}_2$, $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ apod. Schéma krystalizačního zárodku zachycuje obr. 21. [2], [7], [27]



Obr. 21: Vliv aktivních složek v očkovadle na vznik vrstvy vhodné pro nukleaci grafitu [27]

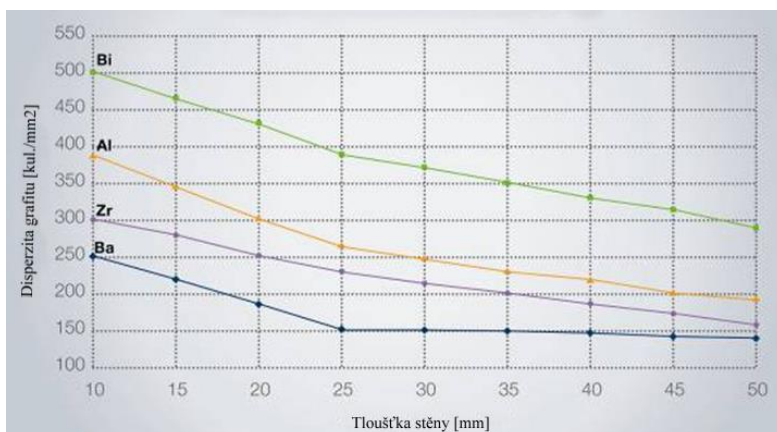
4.5 Odezňování očkovacího účinku

Postupné odeznívání očkovacího účinku je jev v praxi nevyhnutelný a musí se s ním při výrobním postupu litiny bezpodmínečně počítat. Je proto nutné zajistit odlévání taveniny bezprostředně po jejím naočkování, resp. v určitém časovém intervalu, kdy je očkovací účinek ještě zaručen. Při překročení tohoto intervalu, kdy musí být tavenina odlita, se zvyšuje riziko vzniku metalurgických vad. Odezňování tohoto účinku lze prodloužit jednak dvoustupňovým očkováním, tzn. očkování po předchozí modifikaci taveniny – očkování v přelévací pánvi nebo plněným profilem, dále použitím tzn. sekundárního očkování – některá z klasických metod očkování doplněná očkováním očkovacími tělísky přímo ve formě nebo do proudu tekutého kovu vytékajícího z lící pánve těsně nad formou, a nakonec také prvky, které prodlužují dobu očkovacího účinku. [19], [20]

Odezňování souvisí jednak s teplotou taveniny a použitou očkovací předslutinou, ale zejména je to operace závislá na čase. Časový interval začíná přidáním očkovadla do taveniny a končí, jakmile se dosáhne teploty eutektické krystalizace. Během této doby dochází k postupnému a pozvolnému snižování počtu grafíticky vhodných zárodků a tzn. hrubnutí těchto aktivních zárodků v důsledku reoxidace a také k rozpouštění jader zárodků. Tím se mimo jiné vysvětluje vliv doby tuhnutí na výsledek očkování. Zatímco normální tloušťka stěny odlitku tuhne v řádech několika sekund až minut, krystalizace silnostěnných odlitků trvá řádově i několik hodin. Obecně ale rozdíly v tloušťkách stěn, tedy v rychlosti tuhnutí, mají za následek rozdílné odeznívací účinky očkovadel. V tenkých stěnách nebo tam, kde dochází k rychlému odvodu tepla z taveniny, a tedy kratší době tuhnutí, bude v důsledku zatím se neprojevujícího odeznívacího očkovacího účinku větší množství kuliček grafitu (vysoká disperzita grafitu) s menším průměrem. V případě sekundárního očkování je možné použít nižší dávkování primárního očkovadla, neboť se u velmi tenkých stěn nemusí odeznívání do jisté míry zohledňovat. Naopak tomu bude v tlustých stěnách, tedy tam, kde je pomalý odvod tepla, resp.

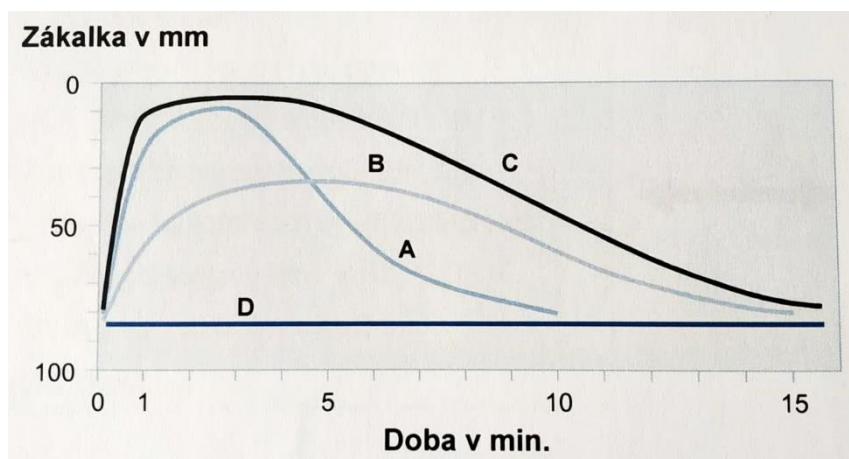
delší doba tuhnutí. V těchto částech odlitku bude kuliček méně, ale zato budou co do průměru větší. Navzdory silným očkovacím účinkům některých prvků je jejich odeznívání velmi rychlé. Naproti tomu předslitiny obsahující prvky jako Ba a Ce významně prodlužují dobu očkovacího účinku, což je vhodné zohlednit u vícestupňového očkovaní. [2], [28]

Existenci závislosti tloušťky stěny, resp. rychlosti tuhnutí, a vlivu aktivních složek v očkovacích prostředcích na disperzitu grafitu tvárné litiny vyjadřuje následující diagram (obr. 22). Díky rychlému tuhnutí jsou očkovací látky velmi účinné i v tenkých stěnách odlitku, zatímco s rostoucí tloušťkou stěn se účinek očkovačel v důsledku delšího tuhnutí snižuje, což se projevuje nižší disperzitou grafitu. Tím se vysvětluje, proč se u velmi hmotných odlitků dosahuje nižší disperzity, jako je tomu u odlitků tenkostěnných, a to i při řádném naočkování. [28]



Obr. 22: Závislost tloušťky stěny na disperzitě grafitu vzhledem k různým aktivním prvkům [28]

Projevy snižování očkovacího účinku jsou vyšší sklon k tvorbě zákalky, nižší grafitizační schopnost a tím snižující se počet eutektických buněk, který je při úplném odeznění stejný jako ve výchozí tavenině před jejím očkovaním. Z těchto důvodů je žádoucí odlévat do řádově několika minut po samotném procesu očkovaní. Odeznívání očkovacího účinku je možné vyjádřit na hloubce zákalky (obr. 23). Očkovadlo A vykazuje rychlé rozpouštění, ale také velmi rychlé odeznívání. Očkovadlo B se rozpouští pomaleji a rychlost jeho odeznívání je pomalejší než u očkovačel A. Křivka očkovačel C má ideální průběh – rychle se rozpouští a zároveň je odeznívání velmi dlouhé, má tedy nejefektivnější očkovací účinek. Pro představu je v grafu také znázorněna křivka D, která vyznačuje v celém časovém úseku stejnou hloubku zákalky – litina by nebyla naočkována vůbec. [2], [19]



Obr. 23: Závislost odeznívání očkovacího účinku na hloubce zákalky [19]

4.6 Vliv aktivních prvků v očkovacích předslitinách

Nejčastěji používaná očkovací předslitina ferosilicium obsahuje celou řadu aktivních prvků, které mají zejména napomáhat grafitizaci a eliminovat vznik karbidů, podporovat vznik dokonale kuličkového grafitu, zpomalovat odeznívání očkovacího účinku, eliminovat vznik mikrostaženin a plynových vad a zlepšovat rozpustnost. Mezi tyto prvky patří např.: Al, Ca, Ba, Bi, Sr, Zr, Mn a KVZ (Ce, La).

- hliník – V očkovacích předslitinách se obsah hliníku pohybuje od 0,5 do 2,5 %, pro odlitky s velmi tenkými průřezy se používají očkovadla s obsahem hliníku 4 %, takto hliník podporuje vznik feritu kolem kuliček grafitu.
- vápník – Obsah vápníku bývá velmi podobný jako obsah hliníku, a sice od 0,1 do 2,5 %. Vápník zlepšuje tvorbu krystalizačních zárodků grafitu a omezuje sklon k tvorbě zákalky při rychlém tuhnutí taveniny.
- baryum – Silně grafitotvorný prvek, který má dobrý sferoidizační účinek na kuličky grafitu. V očkovací předslitině je jeho obvyklé dávkování asi od 1 do 6 % Ba a jeho hlavní předností je významné prodloužení očkovacího účinku. Mimo jiné je schopno vázat dusík a tím snižovat sklon k tvorbě dusíkových bublin. V tavenině tvoří zárodky s vysokou měrnou hmotností, při překročení určitého obsahu má tendenci tvořit strusku.
- bismut – V kombinaci s některým z kovů vzácných zemin zvyšuje počet zárodků grafitu, redukuje velikost kuliček grafitu a sklon k tvorbě zákalky, a to již při obsah 0,1 % v očkovací předslitině. Zabráňuje také flotaci grafitu, na druhou stranu může být příčinou vzniku intercelulárního lamelárního grafitu. V takovém případě je nutné zajistit přítomnost některého z kovů vzácných zemin.
- stroncium – Obsah stroncia bývá nízký, od cca 0,5 do 1,0 %. Význam stroncia je stejný jako barya, a sice, že prodlužuje dobu očkovacího účinku. Snižuje také rychlost rozpouštění očkovadla i při nižších teplotách taveniny. Dále snižuje sklon k tvorbě karbidů a napomáhá zvyšování počtu kuliček grafitu za předpokladu, že se v tavenině nevyskytují KVZ.
- zirkonium – Podobně jako předchozí prvky, tak i zirkonium prodlužuje dobu odeznívání, především je to ale prvek s vysokou afinitou ke kyslíku, má tedy významnou dezoxidační schopnost a zároveň neutralizuje dusík. Obsah zirkonia v očkovací předslitině se pohybuje od 1 do 6 %. V kombinaci s manganem zvyšuje rozpustnost očkovadel.
- mangan – Obsah manganu bývá v porovnání s ostatními prvky vysoký, a sice až do 10 % Mn. Jeho přínos je zlepšení rozpustnosti očkovadel i za nižších teplot. [2], [8], [29]

4.7 Metody očkování

Způsoby přivádění aktivních prvků z očkovacích předslutin do taveniny fungují na stejném principu jako modifikační metody. Jedná se o rozpouštění předslutin o požadovaném množství v tavenině. Samotný proces očkování je pak možné rozdělit na jednostupňové a dvoustupňové. Mezi jednostupňové metody patří ty, při kterých je zároveň rozpouštěna v tavenině modifikační i očkovací předslitina. Na tomto principu fungují metody očkování v pánvi, tzv. Sandwich nebo Tundish, které jsou již popsány v kapitole Modifikace. V těchto pánvích se očkovací předslitina dávkuje asi od 0,5 do 1,0 % FeSi, přičemž její zrnitost se běžně pohybuje od 2 do 6 mm u běžných pánví. Důsledně se musí dbát na správnou zrnitost použitého očkovadla, neboť až příliš vysoká zrnitost může být příčinou nedostatečného rozpouštění očkovadla, nalepování na stěnu pánve a obalování prostředku do strusky. Očkování v pánvi není nijak zvlášť účinná metoda,

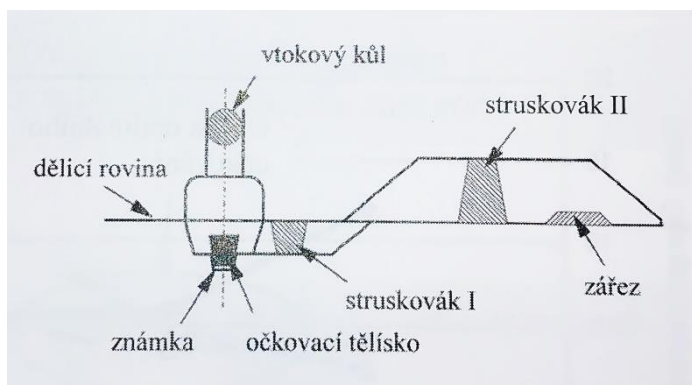
vzhledem k dlouhému intervalu od začátku očkovaní po odlévání, je tedy potřeba vysokého dávkování očkovačla. [2], [28]

Dvoustupňové očkovaní znamená, že se zvlášť provedou procesy modifikace a očkovaní, a to v tomto pořadí. Tato varianta je použitelná zejména pro metody, které nedovolují modifikovat a očkovat taveninu zároveň. Dávkování očkovací předslitiny se pohybuje od 0,1 do 0,2 % FeSi a určuje se podle časového intervalu od začátku očkovaní do odlévání. Metoda očkovaní plněným profilem je podobná modifikaci plněným profilem s tou výjimkou, že v ocelovém drátu není obsažena modifikační předslitina FeSiMg, ale očkovací předslitina FeSi. Očkovaní do proudu kovu je nejčastěji vidět na automatických odlévacích linkách, kdy je velmi jemně zrnité očkovačlo přidáváno do taveniny těsně nad formou v průběhu lití (obr. 24). Takto se může také tzv. sekundárně očkovat, tedy nejprve použít některou z klasických metod očkovaní, a poté, např. kvůli rychlému odeznívajícímu účinku primárního očkovaní, použít ještě sekundární, a to právě do proudu kovu. Při tomto očkovaní ale může docházet, také vlivem nízké teploty lití, k nedostatečnému rozpuštění částic očkovačla a k oxidaci těchto částic, což má za následek vznik vměstků, které se tak dostávají do formy. [2], [20], [28]



Obr. 24: Očkovaní do proudu kovu [30]

Očkovaní očkovacími tělisky uvnitř formy (in-mold) je efektivní metoda, kterou lze dosáhnout minimálního, resp. téměř žádného, odeznívacího účinku. Tělíska se nejčastěji umísťují v očkovací komůrce uvnitř formy, případně v licí jamce nebo pod vtokovým kulem do připravené známky, také mohou být zatmeleny na vkládaném filtru. Při nalévání taveniny do formy dochází k rozpouštění očkovací předslitiny, které ovšem závisí na licí teplotě, podmínkách proudění a druhu očkovačla. Je nutné, aby k rozpouštění docházelo po celou dobu lití, a ještě chvíli po zalití celé formy. Tělíska umístěná na dně licí jamky se zakládají do předem připravených známek a zaručují homogenizaci a naočkovaní taveniny už od začátku odlévání. Toho lze dosáhnout zejména tak, že se licí kůl v horní části formy zadělá ocelovým plechem, který se protaví až s nějakou prodlevou, tím dojde v licí jamce k chvilkové prodlevě taveniny v ní a k nastartování očkovacího procesu. Výhodou této metody očkovaní je, že tělísko ve formě není při odlévání, tedy při jeho zalití, v trvalém kontaktu se vzdušným kyslíkem, a proto nedochází k jeho oxidaci. Problém však nastává při samotném rozpouštění očkovačla, což může být při nesprávném pochopení této metody hlavní nevýhodou – jiná intenzita rozpouštění, než se očekávalo, špatný náběh očkovacího



Obr. 25: Průřezy vtokové soustavy [20]

účinku anebo rozpuštění očkovačidla ještě před tím, než je proces odlévání u konce. Proto je nutné zvolit vhodný typ a velikost očkovačídla tělíska v závislosti na lici teplotě taveniny, hmotnosti odlitku a maximálního času určeného k odlití formy. Rychlost rozpouštění je také závislá na umístění tělíska ve formě, např. pod vtokovým kulem bude rozpouštění intenzivní, naproti tomu tělísko umístěné v klidnější části vtokové soustavy se bude rozpouštět pomaleji. Návrh na vtokovou soustavu (obr. 25) má být takový, aby byla ideálně mírně přetlaková, přičemž poměry průřezů jejích jednotlivých částí mohou být:

$$S_k : S_1 : S_2 : S_z = 5 : 4 : 8 : 3. \quad (4.6)$$

kde: S_k – průřez liciho kúlu [mm²]

S_1, S_2 – průřez rozváděcího (struskového) kanálu [mm²]

S_z – průřez zářezů [mm²]. [20]

Očkovač předslitina FeSi obvykle obsahuje asi 70-78 % křemíku, 1 % vápníku, 4 % hliníku, max. 1 % manganu a případně stopové obsahy některých dalších prvků. V předslitině určené k očkování LLG se mění obsahy hliníku a manganu (1 % Al, 4 % Mn). Dávkování předslitiny v podobě očkovačídla tělísek bývá obvykle okolo 0,10 až 0,15 % z hmotnosti taveniny, která proteče formou přes očkovačídlo tělísko. [20]

4.8 Používaná očkovačidla

Na šedou, tvárnou, popřípadě vermikulární litinu se používají různé druhy očkovačídla předslitin, protože aktivní látky v nich obsažené jinak reagují s jádru nukleačních zárodků, která nejsou v grafitických litinách vždy stejné. Následující tabulka (tab. 3) zaznamenává jednotlivé distributory očkovačídla do tvárné litiny, jejich obchodní označení a konkrétní chemické složení.

Tab. 3: Přehled používaných očkovačídla a jejich chemické složení [31], [32], [33], [34]

Distributor	Název	% Si	% Al	% Ca	% Ba	% Bi	% Sr	% Zr	% Mn	% Mg	% KVZ
ASK Chemicals	VP 116	68-73	2,5-3,3	0,3-1,5						stopový	stopový
	VP 216	68-73	3,2-4,5	0,3-1,5						stopový	stopový
	Germalloy®	68-76	3,2-4,5	0,3-1,5						stopový	stopový
	SMW 605	70-75	0,8-1,2	0,8-1,2		0,8-1,2					0,8-1,2
		70-75	3,5-4,5	max. 1,5		0,5-0,8					0,5-0,8
	SAW 304	70-75	3,5-4,5	max. 1,5		0,5-0,8					0,5-0,8
ELKEM	Alinoc®	64-70	3,5-4,5	0,5-1,5							
	Barinoc®	72-78	max. 1,5	1,0-2,0	2,0-3,0						
	Foundrisil®	73-78	0,75-1,25	0,75-1,25	0,75-1,25						
	Zircinoc®	73-78	1,0-1,5	2,0-2,5				1,3-1,8			
	Ultraseed® Bi	70-76	0,75-1,25	0,75-1,25		0,8-1,3					1,5-2,0
FerroPem	Amerinoc	68-75	0,7-1,5	1,2-2,0	0,1-0,6	0,3-0,8					0,1-0,5
SNAM	ZIMAN®	60-69	0,5-1,5	0,5-2,0	0,3-1,0			2,0-3,0	1,9-2,8		
	HIMAN®	60-65	1,0-1,5	1,0-1,5	4,0-6,0				9,0-11,0		
	STRON® 75	70-75	max. 0,5	max. 0,1			0,6-1,0				
	BIAL®	60-70	0,8-1,5	1,0-1,5		0,8-1,0					0,6-1,0

5 MODIFIKACE

Modifikace je technologická operace při výrobě LKG, která zapříčiní sferoidizaci vylučovaného grafitu, jehož růst způsobují globulitizační prvky, kterými jsou hořčík, vápník nebo kovy vzácných zemin, např. céry. V průmyslu nejrozšířenějším modifikačním prvkem je hořčík, který se při samotném procesu používá jako čistý kov nebo je obsažen v předslitině, nejčastěji je to předslitina FeSiMg (45-50 % Si, 5-25 % Mg), lze ale také použít předslitinu NiMg (5-20 % Mg). Při modifikování dochází k probublávání hořčíkových par taveninou, teplota vypařování hořčíku je při atmosférickém tlaku asi 1107 °C, takže v roztavené litině dochází k jeho vypařování. Pro správný modifikační účinek je nutné, aby dráha bublin hořčíku byla v modifikační pánvi co nejdelší a zbytkový obsah hořčíku rozpuštěného v tavenině byl mezi 0,03-0,06 %. Samotná reakce je velmi prudká a zářivě oslňující a dochází při ní k poměrně velkým ztrátám. Hořčík má vysokou afinitu k síře a kyslíku, proto v tavenině působí jako odsiřovací i dezoxidační prostředek, zároveň ale na hladině tekutého kovu reaguje kyslík se sulfidem hořečnatým, díky čemuž se uvolňuje síra zpět do taveniny. Všechny tyto reakce vysvětlují následující rovnice [2], [23]:



Dalšími možnostmi, jak dosáhnout globulitizačního účinku, je ne tolik rozšířené použití vápníku a kovů vzácných zemin, zejména céru a lanthanu. Kovy vzácných zemin se spíše, než primárně pro modifikaci používají z jiných důvodů, a to proto, že výborně fungují jako grafitizační zárodky, dále jsou schopny do jisté míry neutralizovat vliv nežádoucích prvků jako olovo, bismut, antimon, a nakonec dopomáhají z hlediska snížení dávkování hořčíku a zrovnoměnění samotného procesu modifikace. Nevýhodou těchto prvků je jejich krátká doba účinku, jinými slovy mají rychlou dobu odeznívání. Z těchto důvodů jsou kovy vzácných zemin spíše doprovodnými pomocnými prvky při modifikaci, tedy ne primárně určené k samotné modifikaci. Jejich obsah v modifikačních předslutinách se pohybuje kolem 0,5 %. Vápník se téměř jako globulitizační prvek nevyužívá, i když je jeho účinek silný. Je pouze známo, že se využíval při snížení sklonu k tvorbě zákalky, tj. vznik bílé litiny zejména v místech s rychlým odvodem tepla. [2], [5], [23]

Aby bylo jasné, jaké množství modifikovadla se má do taveniny přidat, je nutné provést následující výpočet:

$$m_{\text{mod}} = \frac{Mg_{\text{zb}} + S}{\eta_{\text{Mg}} \cdot Mg_{\text{FeSi}}} \cdot 100 \cdot 100 \quad (5.5)$$

kde: m_{mod} – množství modifikovadla z hmotnosti kovu [%]

Mg_{zb} – zbytkový obsah hořčíku v tavenině [%]

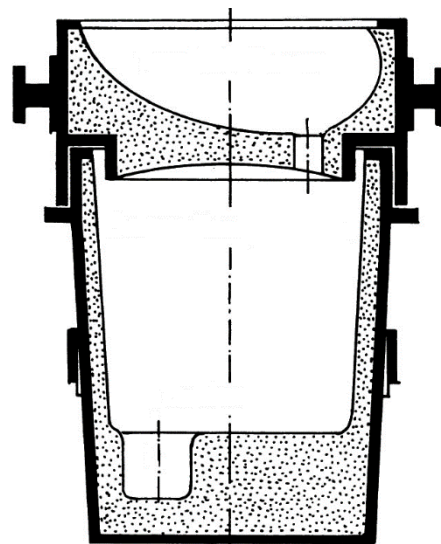
S – výchozí obsah síry v tavenině [%]

η_{Mg} – využití hořčíku [%]

Mg_{FeSi} – obsah hořčíku v předslitině [%]. [2]

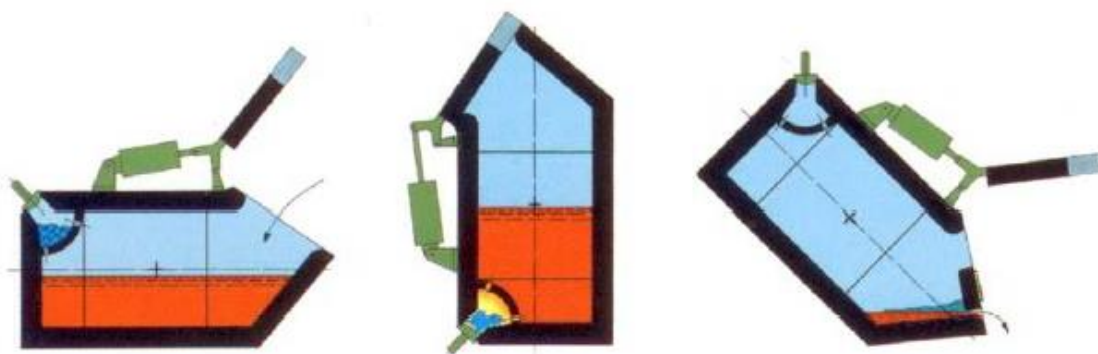
Modifikační metody tvárné litiny se rozdělují podle řady různých kritérií a specifik. Těmi jsou např. procentuální využití hořčíku, tedy ztráty vniklé během procesu, množství dávky a druh modifikačního prostředku a v neposlední řadě finanční stránka věci. Z technologického hlediska lze tyto modifikační metody zevrubně rozdělit na přelévací, ponorné a průtokové. Mezi přelévací lze řadit metody Sandwich a Tundish, do ponorných metod ponorného zvonu a plněný profil a do průtokových modifikací v konvertoru a metodu in-mold. [2], [23]

Metoda Sandwich se skládá ze štíhlé vysoké pánve na jejímž dně je komora, do které se se umísťuje modifikační předslitina FeSiMg, na ní přijde vrstva očkovadla FeSi a celá komora se potom přikryje vrstvou tenkých ocelových plechů – tato vrstva má zabránit předčasnému vyplavání modifikovadla a očkovadla. Po nalití taveniny do pánve se plech nataví, a protože má litina větší měrnou hmotnost než přidané předslitiny, během rozpouštění začnou vystupovat směrem k hladině kovu. Díky vysoké pánvi působí na její dno vyšší metalostatický tlak, který zapříčiní uklidnění prudce oslňující modifikační reakce, zároveň je tak delší dráha, po které bubliny odpařujícího se hořčíku probublávají taveninou a tím se zvyšuje jeho využití, které ovšem není nijak zvlášť vysoké (40-50 %). Modifikační metoda Tundish (obr. 26) zvyšuje využití hořčíku, a sice tak, že na vršek modifikační pánve je umístěno víko s nalévacím otvorem, jinak je metoda stejná jako metoda Sandwich. Víko částečně zabráňuje přístupu vzdušného kyslíku k hladině taveniny, čímž se zamezí vzniku ztrát oxidací hořčíku a zároveň rozstříku taveniny. Tímto se docílí 60-70 % využití hořčíku. [2], [7], [23]



Obr. 26: Tundish [35]

Při modifikaci v konvertoru (obr. 27) se do grafitové modifikační komůrky s otvory umístěné na dně konvertoru vkládá čistý hořčík. Poté se dovnitř nalije tavenina a konvertor se otočí tak, aby byla komůrka ve styku s taveninou. Uvnitř komůrky se začne zvyšovat tlak hořčíkových bublin. Při jejich vypařování a přesáhnutí tlaku metalostatického se tyto bubliny začnou uvolňovat do zbytku taveniny. Tímto procesem se do řádově několika desítek sekund tavenina namodifikuje. Výhodou této metody je, že se hořčík do tekutého kovu nedostává z předslitiny, nedochází tedy ke vzniku kyselé strusky, ale strusky zásadité tvořené zejména sulfidem hořečnatým MgS, který se z hladiny lehce odstraňuje. Využití hořčíku touto metodou se pohybuje mezi 50-70 %. [2], [7], [23]



Obr. 27: Modifikace v konvertoru [36]

Plněný profil je ponorná metoda, kterou se litina nejprve modifikuje a poté hned očkuje. Modifikační přípravek je obvykle předslitina FeSiMg (25-30 % Mg) zabalená ještě s dalšími pomocnými prvky v ocelovém drátu, který se postupně odvíjí a přesně danou rychlostí se ponořuje do taveniny. V průběhu ponoru se drát odtaví, ideálně u dna, a tak se předslitiny dostanou do taveniny. Výhodou této metody je vysoké využití hořčíku pohybující se okolo 65-75 %, nevýhodou je však vysoká pořizovací cena samotného zařízení a plněného profilu. Podobně vysokého využití hořčíku (60-80 %) se dosahuje modifikací in-mold, ke které dochází až ve vtokové soustavě formy při odlévání. V ní je vytvořena modifikační komůrka, do které se umísťuje přesně odměřené množství předslitiny FeSiMg. Takto modifikovaná litina se už

neočkuje a metoda je vhodná především pro slévárny, které disponují např. automatickou formovací linkou, která je schopná zajistit také přesné dávkování modifikovadla. [2], [7], [23]

5.1 Modifikační účinek KVZ

Tuhnutí tenkostěnných odlitků z litiny se vyznačuje jednak zvýšeným sklonem k tvorbě zákalky, tedy metastabilního tuhnutí za vzniku ledeburitu, ale také vyšším rizikem vzniku pórovitosti při smršťování. Tendence vzniku zákalky je při modifikaci spojená s antigrafitizačním účinkem hořčíku, který je obsažen v modifikační předslitině. Qizhou [37] pojednává o srovnání účinku modifikačních prostředků s obsahy lanthanu a céru s následujícími závěry:

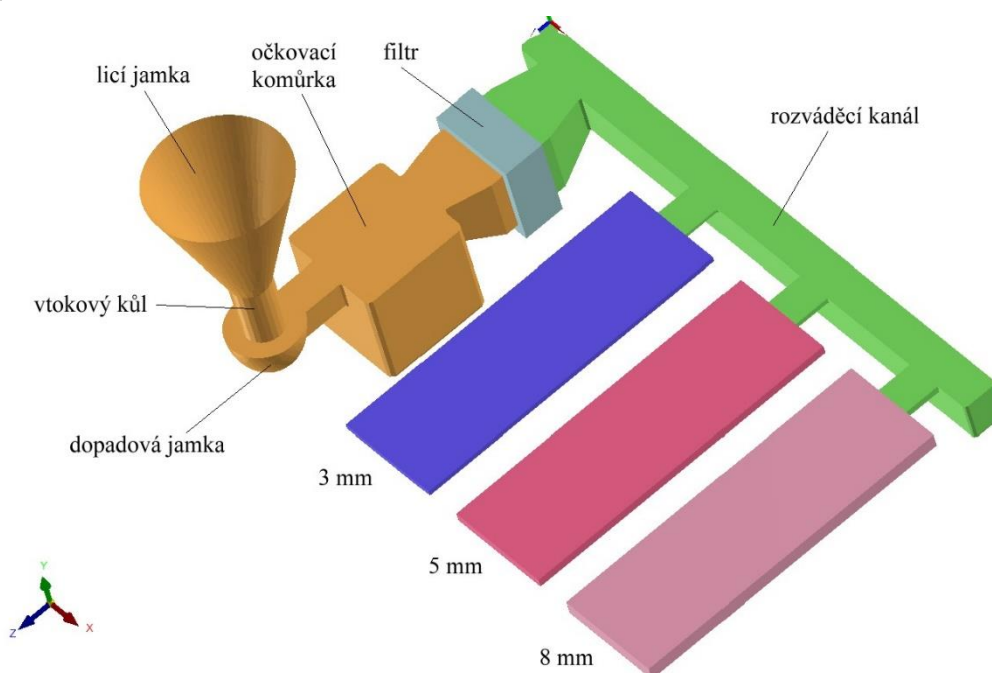
- V případě modifikace předslitinou s přídavkem lanthanu (FeSiMgLa) byl počet kuliček grafitu dvakrát až třikrát větší než při použití stejné předslitiny s přídavkem céru (FeSiMgCe), přičemž došlo k 10-20 % nárůstu stupně sferoidizace.
- Tavenina modifikovaná předslitinou FeSiMgLa vykazuje nižší sklon k tvorbě zákalky a pórovitosti. Při obsahu 0,5 % La nebyly ve struktuře nalezeny volné karbidy nebo pórovitost ani v tepelných uzlech při tloušťce stěny 5 mm, a to i v případě, že nedošlo k naočkování taveniny.
- Množství perlitu ve struktuře tvárné litiny bylo o 50 % nižší při použití modifikovadla FeSiMgLa v porovnání s předslitinou FeSiMgCe. [37]

6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části této diplomové práce bylo ověřit grafitizační účinek vybraných očkovaadel zejména na mechanické vlastnosti (pevnost, tvrdost), ale také na strukturu (podíl feritu a perlitu, velikost a tvar grafitu), tenkostěnných destiček z tvárné litiny.

6.1 Model a formování

Model odlitku se skládal z lící jamky, vtokového kůlu, dopadové jamky, očkovací komůrky, filtru, rozváděcího (struskového) kanálu, zářezů a tří zkušebních destiček (obr. 28). V každé formě byl pro lepší odvod plynů udělán v dělicí rovině výfuk, a to z každé destičky zvlášť. Nejen z důvodu úniku plynů vznikajících při odlévání, ale také pro odvod vzduchu, který by jinak mohl způsobit nezaběhnutí kovu do celého objemu zkušební destičky, neboť by svým objemem bránil tavenině při zaplňování formy. Všechny destičky měly stejnou délku (180 mm) a šířku (60 mm), ale lišily se v tloušťce (3 mm, 5 mm, 8 mm). Celkem tak bylo ve školní slévárně FSI VUT zhotoveno 30 forem s křemičitým ostřivem a organickým pojivem Geopol.



Obr. 28: Kompletní model odlitku

6.2 Použitá očkovadla

Dohromady bylo na experiment použito 11 očkovaadel (tab. 4). Samotné očkování bylo vždy provedeno ve formě (in-mold) v očkovací komůrce, přičemž byla buď použita očkovací tělíska nebo drcená očkovaadla o různé zrnitosti. Výjimkou bylo umístění očkovacího tělíska u tavby E, a to nikoliv do očkovací komůrky, ale do známky vytvořené v dopadové jamce hned pod vtokovým kulem. Důvodem byla snaha o co nejlepší rozpuštění tělíska, neboť bylo vyzorováno, že některá tělíska mají tendenci se nedokonale rozpouštět, pokud jsou umístěna v očkovací komůrce (obr. 29). To je ale patrně způsobeno tím, že celý odlitek je velmi tenkostěnný a rychlost odvodu tepla z formy je



Obr. 29: Stopa po očkovacím tělísku

poměrně vysoká, proto se velmi rychle dosáhne teploty solidu a pokud se tělísko do té doby nestihlo rozpustit, potom už ani nemůže. Dávkování všech očkovaadel bylo stanoveno (současně se tak obvykle může v praxi pohybovat) na 0,1 % z hmotnosti odlitku. Celý odlitek vážil cca 7 kg, proto by očkovaadlo mělo vážit 7 g, ovšem pro zajištění dokonalého naočkování u takto tenkých stěn bylo nakonec rozhodnuto o zvýšení hmotnosti všech očkovaadel na 10 g.

Tab. 4: Chemické složení očkovaadel použitých pro experiment

#	Název	% Si	% Mg	% Al	% Ca	% Mn	% Zr	% Bi	% KVZ	% S, O
1	Blend 8351	70,90	1,54	3,98	1,31					
2	Blend 8353	71,10	2,13	0,86	0,86		1,77			
3	Blend 8466	67,57	1,12	3,58	1,02					
4	Blend 8498	67,60	0,99	3,65	1,13		1,61			
5	Blend 8513	64,53	1,07	1,04	1,23	3,96	3,78			
6	Blend 8528	72,17	0,70	0,36	0,27					
7	Germalloy	68-76	stop.	3,2-4,5	0,3-1,5				stop.	
8	Inocast 100	62-69		3,2-4,5	0,5-1,5					
9	Ultraseed Ce	70-76		0,70-1,25	0,70-1,25				1,5-2,0	< 1,0
10	Ultraseed Bi	70-76		0,70-1,25	0,70-1,25			0,8-1,3	1,5-2,0	< 1,0
11	Inocast 175									

Protože bylo vyrobeno celkem 30 forem, uděláno 5 taveb tvárné litiny a použito 11 očkovaadel, bylo nutné vytvořit systém značení, aby bylo možné jednoznačně určit z jaké tavby a se kterým očkovaadlem byl vybraný odlitek vyroben. Systém využívá jedno písmeno na začátku (A-E), které označuje tavbu, za ní následuje číslo (1-6), které značí pořadí forem při odlévání (č. 1 znamená, že se forma v dané tavně odlévala jako první, č. 6 jako poslední), přičemž pro každou tavbu vzniklo pouze 6 forem a poslední číslo za pomlčkou označuje konkrétní očkovaadlo (1-11), viz. tab. 4. Například B2-8 znamená, že je to odlitek z druhé formy z tavby B, který byl naočkován předslutinou č. 8 (Inocast 100). Následující tabulka zaznamenává označení jednotlivých vzorků dle dané tavby a použitého očkovaadla (tab. 5).

Tab. 5: Označení vzorků dle tavby a očkovaadla

A	B	C	D	E
A1-1	B1-7	C1-1	D1-7	E1-1
A2-2	B2-8	C2-2	D2-8	E2-2
A3-3	B3-9	C3-3	D3-9	E3-3
A4-4	B4-10	C4-4	D4-10	E4-4
A5-5	B5-11	C5-5	D5-11	E5-5
A6-6	B6-6	C6-6	D6-6	E6-6

6.3 Tavby a odlévání

Tavení probíhalo na elektrické indukční peci ve školné slévárně FSI VUT. Celkem bylo provedeno 5 taveb tvárné litiny, přičemž tavby A a B byly modifikovány předslutinou Elmag, zatímco tavby C, D a E byly modifikovány předslutinou Lamet. Obě modifikační předslitiny byly v pánvi při přelévání taveniny z pece přikryty směsí Topseed. Topseed podporuje hořčík jako sferoidizační prvek a tím zvyšuje jeho využitelnost při zakulacování grafitu, zároveň mění charakter strusky tak, že je pak lépe odstranitelná z hladiny tekutého kovu [38]. Všechny tavby byly namodifikovány a odlity zhruba ve stejném čase. Čas od začátku modifikace do začátku odlévání první formy byl vždy cca 2 minuty (prodlevy při manipulaci s pánví, stahování strusky

apod.), samotný čas odlévání každých šesti forem v jedné tavbě byl průměrně 40-50 s, doba odlévání 1 formy byla průměrně cca 4 s.

Požadovaného chemického složení (tab. 6) se ne úplně vždy podařilo dosáhnout. Cílová hodnota uhlíkového ekvivalentu byla $CE = 4,4-4,7$.

Tab. 6: Požadované chemické složení

	% C	% Si	% Mn
min	3,6	2,5	
max	3,8	2,7	0,5

6.3.1 Tavba A

Tab. 7: Vsázkové suroviny pro tavbu A

Vsázka A	ocel	vrat LKG	SŽ	uhlík	FeSi75	ELMAG	Topseed	plechy
m [kg]	3	30	23	0,26	0,55	0,67	0,36	3

- hmotnost vsázky: 61 kg
- dolegování: 0,18 kg C; 0,05 kg FeSi75
- teplota odpichu: 1560 °C
- teplota lití: 1350 °C

Tab. 8: Chemické složení tavby A

Pec	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% Ni	% Cu
	3,926	1,897	0,153	0,032	0,042	0,043	0,002	0,019	0,026
	% Co	% Mg	% Nb	% Pb	% Sn	% Ti	% V	% W	Cekv
	0,010	0,005	0,002	0,003	0,002	0,012	0,002	0,005	4,563
Pánev	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% Ni	% Cu
	3,652	2,903	0,172	0,032	0,028	0,050	0,003	0,020	0,027
	% Co	% Mg	% Nb	% Pb	% Sn	% Ti	% V	% W	Cekv
	0,016	0,054	0,002	0,004	0,003	0,015	0,002	0,005	4,621

6.3.2 Tavba B

Tab. 9: Vsázkové suroviny pro tavbu B

Vsázka B	ocel	vrat LKG	SŽ	uhlík	FeSi75	ELMAG	Topseed	plechy
m [kg]	3	30	23	0,4	0,55	0,67	0,36	3

- hmotnost vsázky: 61 kg
- teplota odpichu: 1564 °C
- teplota lití: 1410 °C

Tab. 10: Chemické složení tavby B

Pec	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% Ni	% Cu
	4,275	1,986	0,174	0,032	0,059	0,03	0,002	0,016	0,028
	% Co	% Mg	% Nb	% Pb	% Sn	% Ti	% V	% W	Cekv
	0,003	0,005	0,002	0,003	0,002	0,011	0,002	0,005	4,941
Pánev	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% Ni	% Cu
	3,579	2,864	0,187	0,032	0,036	0,034	0,002	0,015	0,028
	% Co	% Mg	% Nb	% Pb	% Sn	% Ti	% V	% W	Cekv
	0,006	0,058	0,002	0,003	0,003	0,013	0,002	0,005	4,534

6.3.3 Tavba C

Tab. 11: Vsázkové suroviny pro tavbu C

Vsázka C	ocel	vrat LKG	SŽ	uhlík	FeSi75	LAMET	Topseed	plechy
m [kg]	3	30	23	0,33	0,33	0,91	0,36	3

- hmotnost vsázky: 61 kg
- dolegování: 0,182 kg C
- teplota odpichu: 1561 °C
- teplota lití: 1374 °C

Tab. 12: Chemické složení tavby C

Pec	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% Ni	% Cu
	3,979	1,696	0,157	0,033	0,058	0,021	0,001	0,012	0,017
	% Co	% Mg	% Nb	% Pb	% Sn	% Ti	% V	% W	Cekv
	0,002	0,005	0,002	0,003	0,002	0,009	0,002	0,005	4,550
Pánev	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% Ni	% Cu
	3,770	2,688	0,176	0,033	0,045	0,026	0,001	0,012	0,019
	% Co	% Mg	% Nb	% Pb	% Sn	% Ti	% V	% W	Cekv
	0,004	0,056	0,003	0,003	0,002	0,012	0,002	0,006	4,667

6.3.4 Tavba D

Tab. 13: Vsázkové suroviny pro tavbu D

Vsázka D	ocel	vrat LKG	SŽ	uhlík	FeSi75	LAMET	Topseed	plechy
m [kg]	3	30	23	0,4	0,33	0,91	0,36	3

- hmotnost vsázky: 61 kg
- teplota odpichu: 1563 °C
- teplota lití: 1403 °C

Tab. 14: Chemické složení tavby D

Pec	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% Ni	% Cu
	4,359	1,707	0,171	0,037	0,079	0,022	0,001	0,013	0,022
	% Co	% Mg	% Nb	% Pb	% Sn	% Ti	% V	% W	Cekv
	0,002	0,006	0,002	0,003	0,002	0,010	0,002	0,005	4,934
Pánev	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% Ni	% Cu
	3,616	2,868	0,188	0,033	0,049	0,031	0,002	0,015	0,024
	% Co	% Mg	% Nb	% Pb	% Sn	% Ti	% V	% W	Cekv
	0,005	0,055	0,003	0,004	0,002	0,013	0,003	0,005	4,573

6.3.5 Tavba E

Tab. 15: Vsázkové suroviny pro tavbu E

Vsázka E	ocel	vrat LKG	SŽ	uhlík	FeSi75	LAMET	Topseed	plechy
m [kg]	3	30	23	0,25	0,30	0,70	0,60	0,5

- hmotnost vsázky: 59 kg
- dolegování: 0,21 kg C; 0,36 kg FeSi75
- teplota odpichu: 1564 °C
- teplota lití: 1408 °C

Tab. 16: Chemické složení tavby E

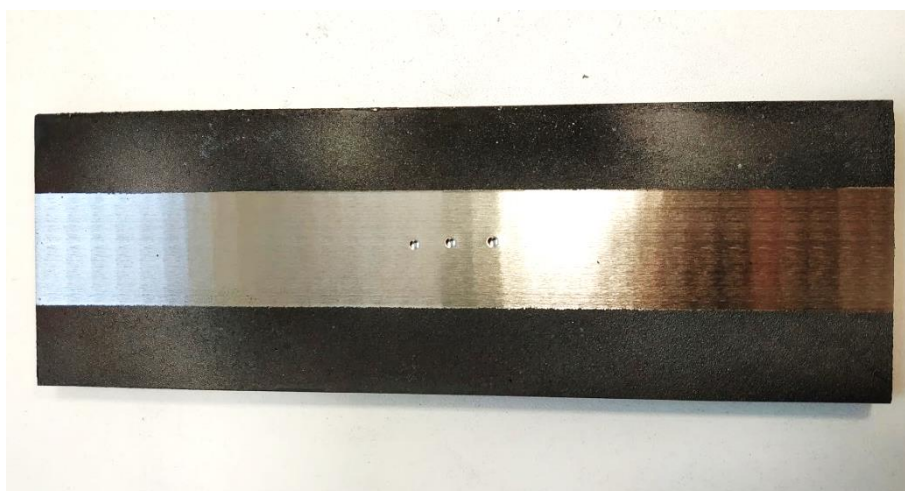
Pec	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% Ni	% Cu
	3,847	1,432	0,139	0,028	0,062	0,025	0,001	0,014	0,027
	% Co	% Mg	% Nb	% Pb	% Sn	% Ti	% V	% W	Cekv
Pánev	0,003	0,005	0,002	0,003	0,001	0,007	0,001	0,005	4,328
	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% Ni	% Cu
	3,658	3,149	0,154	0,030	0,053	0,029	0,002	0,015	0,027
Pánev	% Co	% Mg	% Nb	% Pb	% Sn	% Ti	% V	% W	Cekv
	0,004	0,037	0,002	0,003	0,002	0,012	0,002	0,006	4,707

6.4 Vyhodnocení tvrdosti

Z hlediska mechanických vlastností LKG byl nejprve účinek grafitizačních očkovačů zkoumán na tvrdosti, konkrétně na tvrdosti podle Brinella (ČSN EN ISO 6506-1, Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Brinella – Část 1: Zkušební metoda). Kulička z tvrdokovu o průměru D se vtlačuje do povrchu zkušebního tělesa a po odlehčení zkušebního zatížení se měří průměr vtisku, potom je tvrdost podle Brinella úměrná poměru zkušebního zatížení a plochy zaobleného povrchu vtisku.

Měření a vyhodnocování tvrdosti probíhalo na Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI VUT v Brně. Každá destička (zkušební vzorek) byla opatřena třemi vpichy z nichž byla vypočtena průměrná hodnota tvrdosti v daném místě spolu se směrodatnou odchylkou. Plocha destičky, na níž byla tvrdost měřena, byla ofrézována do hloubky 0,3 mm od povrchu, a to z důvodu přesnějšího odečítání průměrů vpichu po indentoru a také proto, aby byla měřena skutečná tvrdost struktury, a nikoliv povrchové licí kůry (obr. 30). Definujícími parametry měření tvrdosti podle Brinella byly:

- kulička o průměru 5 mm
- zkušební zatížení o velikosti 750 kp
- doba zatěžování 10 s
- zápis dle normy: HBW 5/750/10.

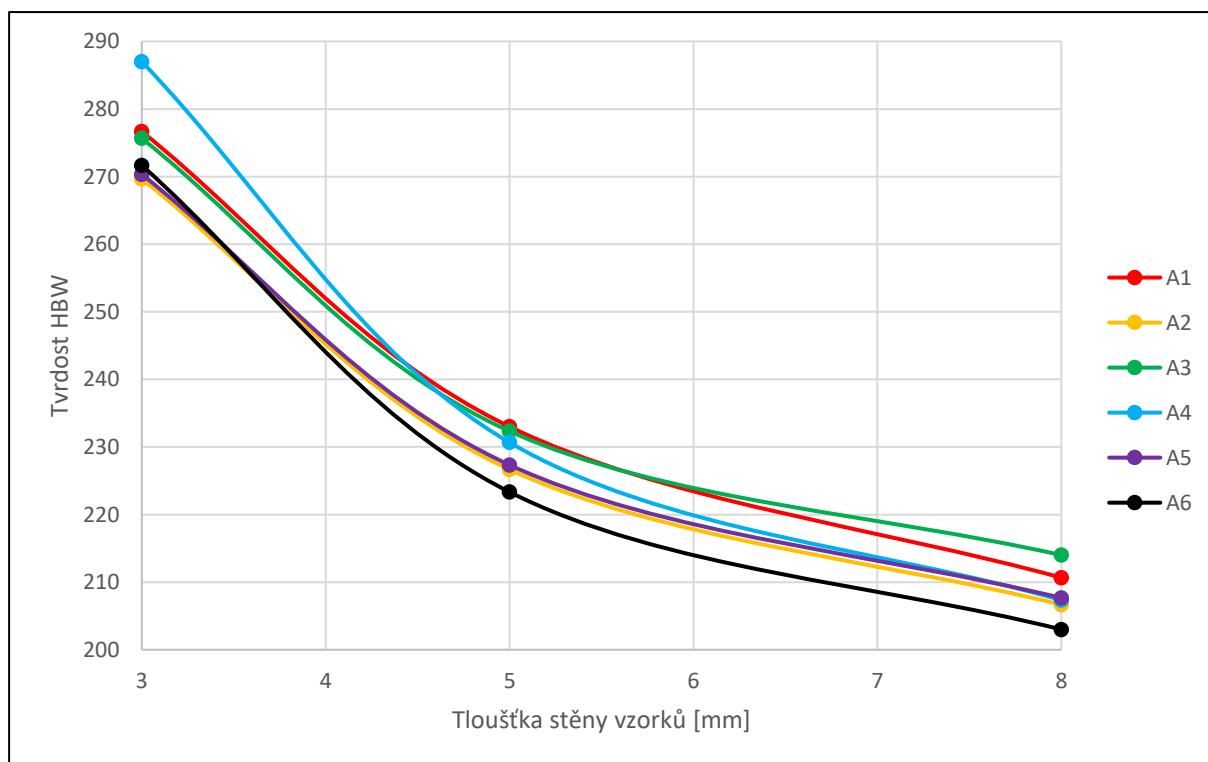


Obr. 30: Místa vpichu pro změření tvrdosti

Tab. 17: Tvrdosti destiček z tavby A

Tavba A	A1-1	A2-2	A3-3	A4-4	A5-5	A6-6
3 mm	285	265	278	281	270	266
	271	272	279	285	271	265
	274	272	270	295	270	284
\bar{x}	276,7	269,7	275,7	287,0	270,3	271,7
$\sigma(x)$	6,02	3,30	4,03	5,89	0,47	8,73
5 mm	227	229	243	231	232	223
	236	225	226	231	226	225
	236	226	228	230	224	222
\bar{x}	233,0	226,7	232,3	230,7	227,3	223,3
$\sigma(x)$	4,24	1,70	7,59	0,47	3,40	1,25
8 mm	209	208	212	206	206	201
	207	208	216	207	208	206
	216	204	214	209	209	202
\bar{x}	210,7	206,7	214,0	207,3	207,7	203,0
$\sigma(x)$	3,86	1,89	1,63	1,25	1,25	2,16

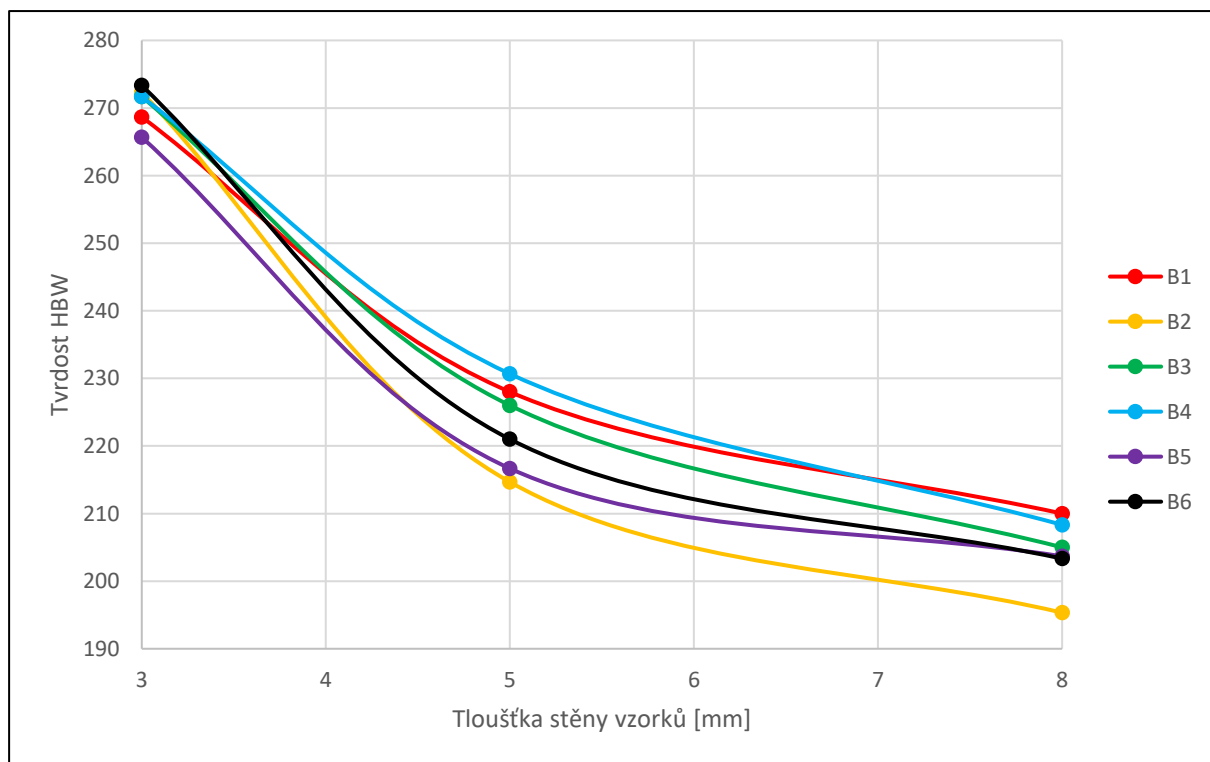
Graf 1: Vliv tloušťky stěny na tvrdost – tavba A



Tab. 18: Tvrdomosti destiček z tavby B

Tavba B	B1-7	B2-8	B3-9	B4-10	B5-11	B6-6
3 mm	273	278	267	274	263	268
	272	271	276	270	268	275
	261	268	272	271	266	277
\bar{x}	268,7	272,3	271,7	271,7	265,7	273,3
$\sigma(x)$	5,44	4,19	3,68	1,70	2,05	3,86
5 mm	224	213	225	232	216	225
	228	213	226	228	217	222
	232	218	227	232	217	216
\bar{x}	228,0	214,7	226,0	230,7	216,7	221,0
$\sigma(x)$	3,27	2,36	0,82	1,89	0,47	3,74
8 mm	212	194	207	210	203	202
	207	196	203	209	202	205
	211	196	205	206	206	203
\bar{x}	210,0	195,3	205,0	208,3	203,7	203,3
$\sigma(x)$	2,16	0,94	1,63	1,70	1,70	1,25

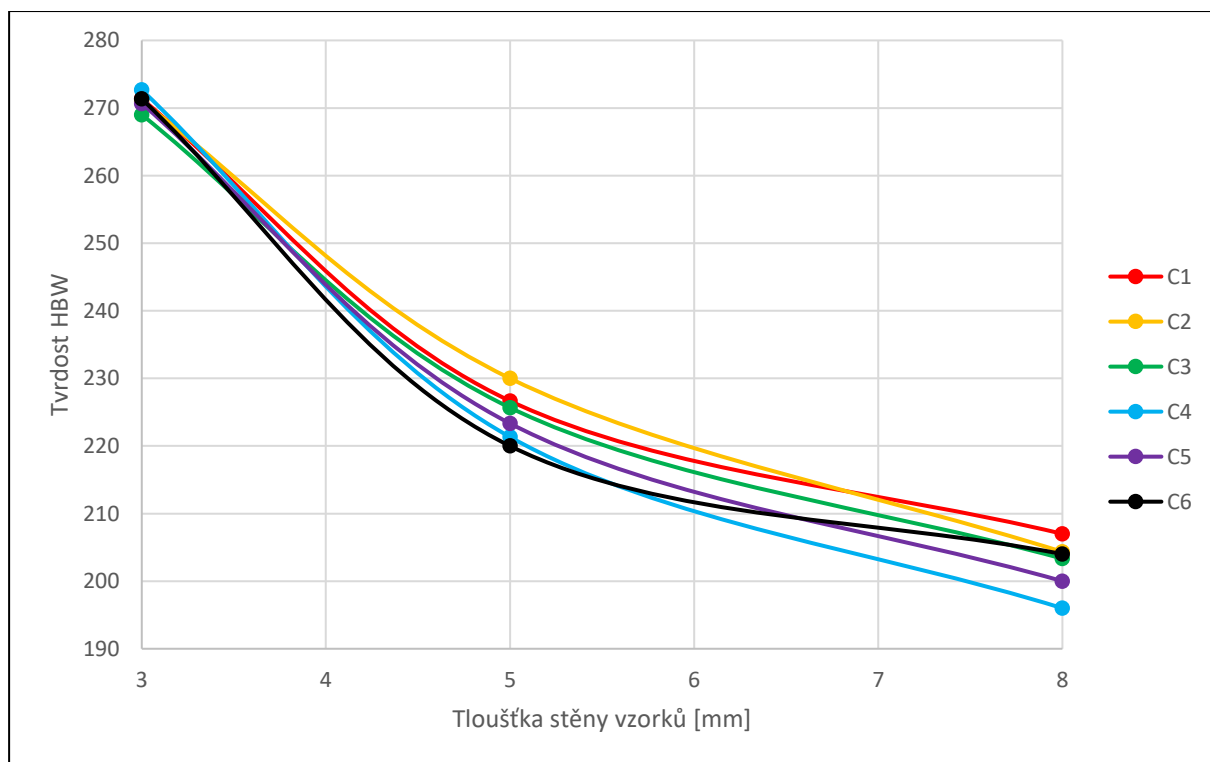
Graf 2: Vliv tloušťky stěny na tvrdost – tavba B



Tab. 19: Tvrdosti destiček z tavby C

Tavba C	C1-1	C2-2	C3-3	C4-4	C5-5	C6-6
3 mm	278	281	272	279	277	272
	263	266	267	267	268	273
	273	266	268	272	267	269
\bar{x}	271,3	271,0	269,0	272,7	270,7	271,3
$\sigma(x)$	6,24	7,07	2,16	4,92	4,50	1,70
5 mm	223	228	226	223	225	221
	229	230	225	218	221	227
	228	232	226	223	224	212
\bar{x}	226,7	230,0	225,7	221,3	223,3	220,0
$\sigma(x)$	2,62	1,63	0,47	2,36	1,70	6,16
8 mm	207	204	203	199	199	207
	206	207	204	193	199	203
	208	202	203	196	202	202
\bar{x}	207	204,3	203,3	196	200	204
$\sigma(x)$	0,82	2,05	0,47	2,45	1,41	2,16

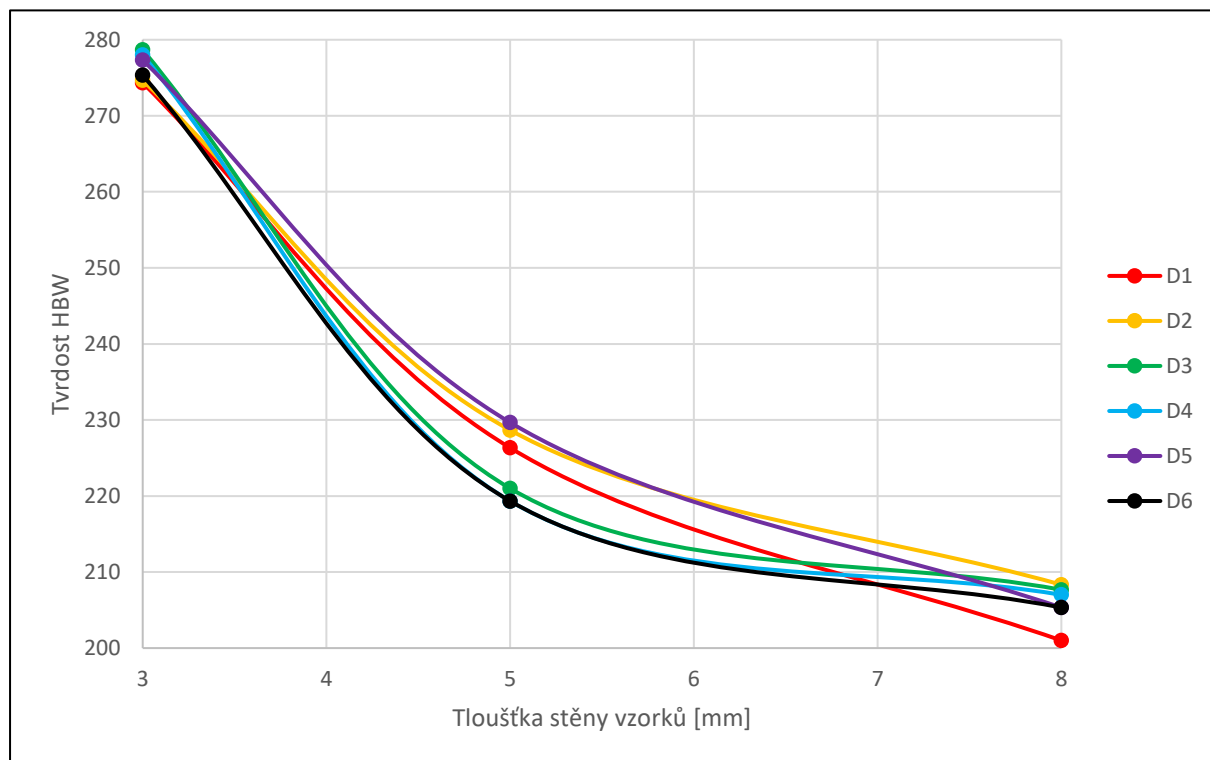
Graf 3: Vliv tloušťky stěny na tvrdost – tavba C



Tab. 20: Tvrdosti destiček z tavby D

Tavba D	D1-7	D2-8	D3-9	D4-10	D5-11	D6-6
3 mm	279	286	283	279	288	281
	266	269	281	286	268	271
	278	269	272	269	276	274
\bar{x}	274,3	274,7	278,7	278,0	277,3	275,3
$\sigma(x)$	5,91	8,01	4,78	6,98	8,22	4,19
5 mm	229	233	225	215	232	216
	226	225	221	222	229	222
	224	228	217	221	228	220
\bar{x}	226,3	228,7	221,0	219,3	229,7	219,3
$\sigma(x)$	2,05	3,30	3,27	3,09	1,70	2,49
8 mm	202	209	209	210	209	207
	200	208	208	205	203	206
	201	208	206	206	204	203
\bar{x}	201,0	208,3	207,7	207,0	205,3	205,3
$\sigma(x)$	0,82	0,47	1,25	2,16	2,62	1,70

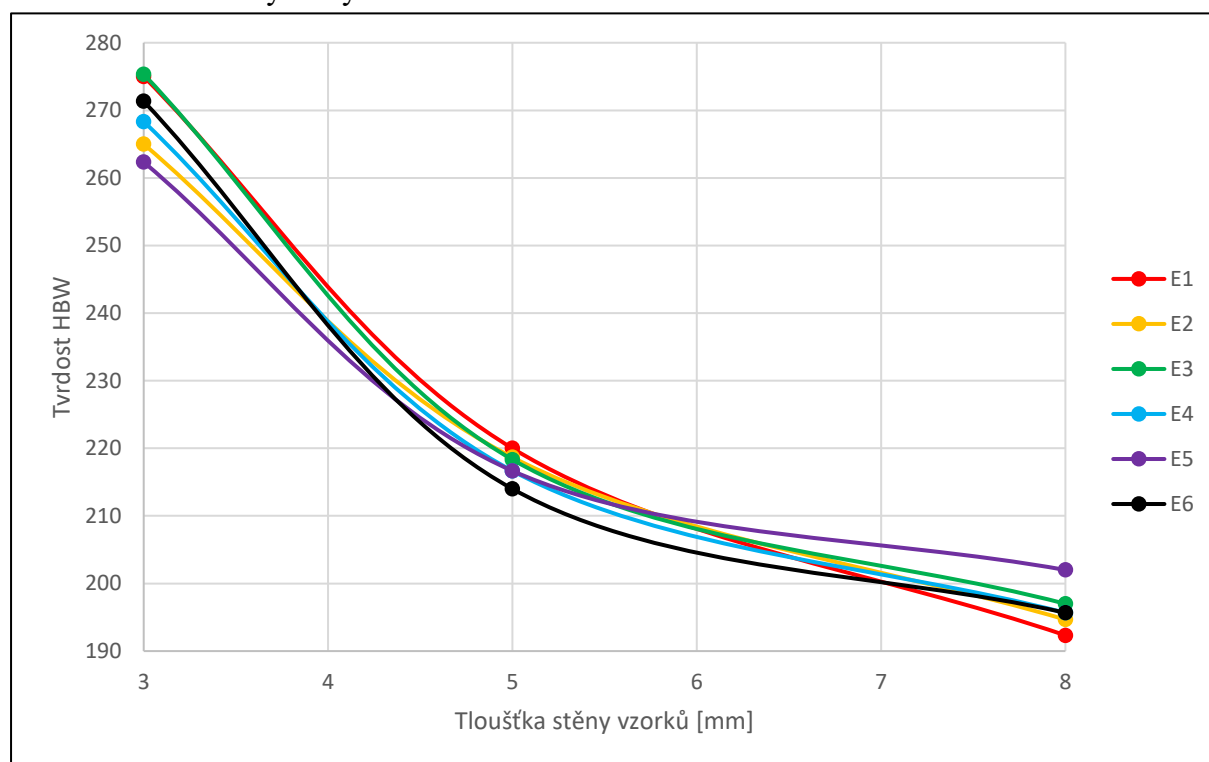
Graf 4: Vliv tloušťky stěny na tvrdost – tavba D



Tab. 21: Tvrdosti destiček z tavby E

Tavba E	E1-1	E2-2	E3-3	E4-4	E5-5	E6-6
3 mm	268	261	275	264	260	271
	278	267	278	279	262	280
	279	267	273	262	265	263
\bar{x}	275,0	265,0	275,3	268,3	262,3	271,3
$\sigma(x)$	4,97	2,83	2,05	7,59	2,05	6,94
5 mm	217	221	218	216	218	210
	220	210	210	210	217	212
	223	225	227	224	215	220
\bar{x}	220,0	218,7	218,3	216,7	216,7	214,0
$\sigma(x)$	2,45	6,34	6,94	5,73	1,25	4,32
8 mm	191	194	196	195	202	194
	193	194	197	198	201	197
	193	196	198	194	203	196
\bar{x}	192,3	194,7	197,0	195,7	202,0	195,7
$\sigma(x)$	0,94	0,94	0,82	1,70	0,82	1,25

Graf 5: Vliv tloušťky stěny na tvrdost – tavba E



Z výsledků znázorněných v grafech (Graf 1-5) se jednoznačně potvrzuje pravidlo závislosti tvrdosti na tloušťce stěny, která má hyperbolický charakter – s rostoucí tloušťkou stěny, tedy pomalejším odvodem tepla z formy a nižší rychlostí tuhnutí, se tvrdost snižuje. Podobný trend se dá očekávat v grafech závislosti pevnosti zkušebních destiček na tloušťce stěny, neboť u litiny s kuličkovým grafitem existuje paralelní závislost mezi pevností a tvrdostí. Tvrdosti nejtenších destiček o tloušťce 3 mm se nejčastěji pohybují mezi hodnotami 260-280 HBW, při tloušťce 5 mm je to cca 220-230 HBW a při tloušťce 8 mm cca 200-210 HBW.

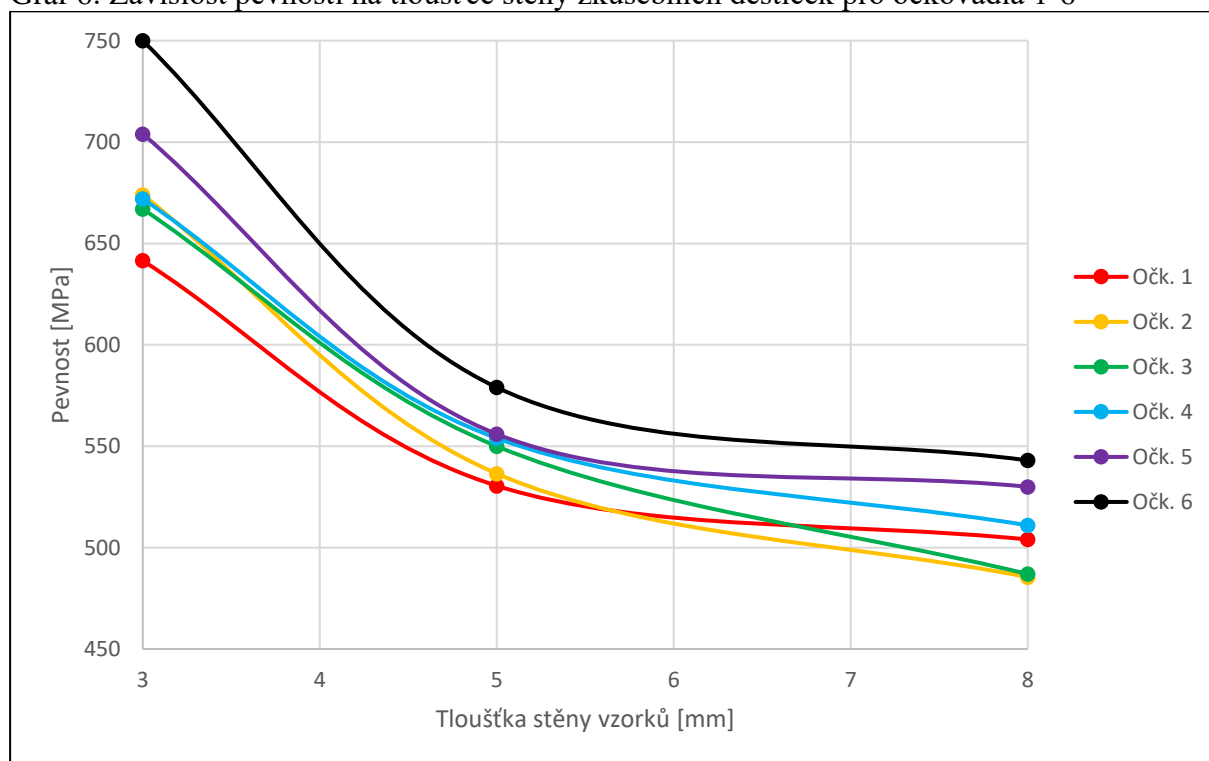
6.5 Vyhodnocení pevnosti a tažnosti

Na Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI VUT v Brně se provedla tahová zkouška, díky níž bylo možné vyhodnotit pevnosti a tažnosti dílčích destiček (tavba E). Z každé destičky byly dle normy ČSN EN ISO 6892-1 (Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty) vyrobeny dva ploché vzorky obdélníkového průřezu, na nichž pak probíhala samotná zkouška. Ploché vzorky, na jejichž lomové ploše byla jasně viditelná vada, byly z měření vyřazeny. Výsledky zjištěné meze pevnosti (R_m [MPa]) a tažnosti (A [%]) jsou zaznamenány v tabulkách níže.

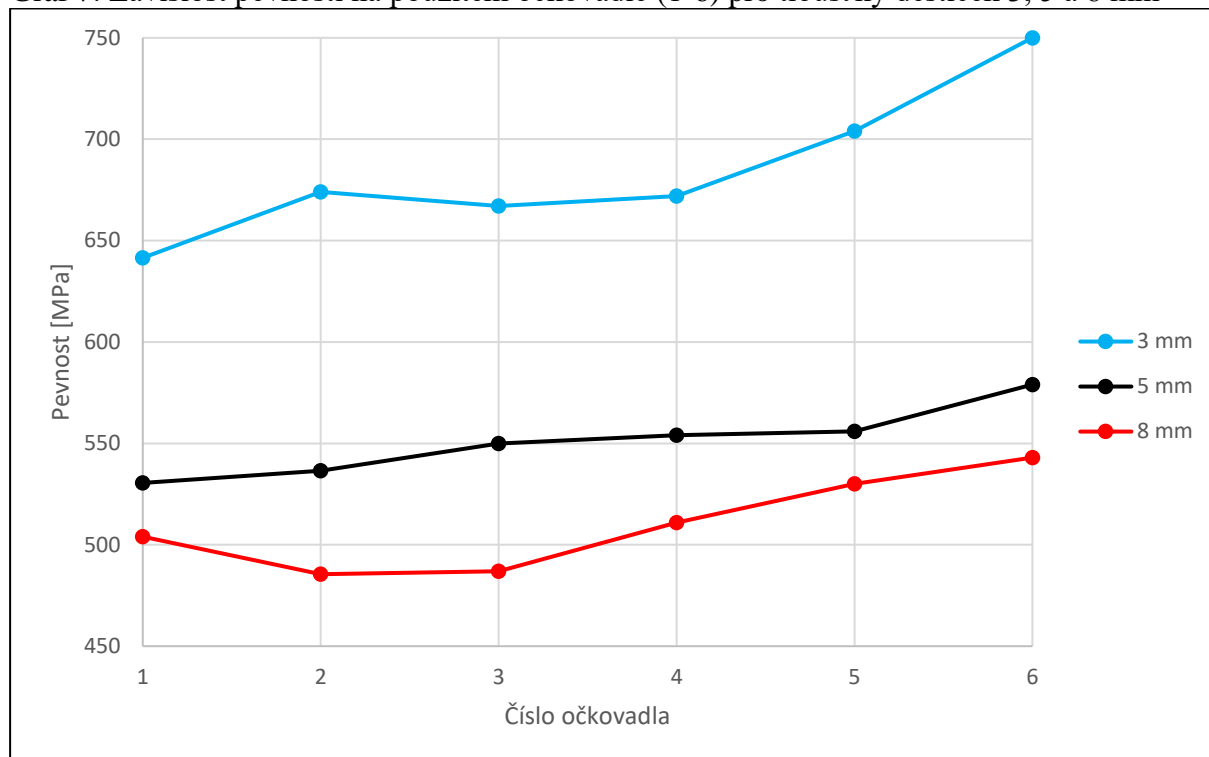
Tab. 22: Pevnosti zkušebních destiček z tavby E

	R_m [MPa]								
	3 mm			5 mm			8 mm		
	x	\bar{x}	$\sigma(x)$	x	\bar{x}	$\sigma(x)$	x	\bar{x}	$\sigma(x)$
E1-1	647	641,5	5,50	521	530,5	9,50	493	504,0	11,00
	636			540			515		
E2-2	674	-	-	535	536,5	1,50	483	485,5	2,50
				538			488		
E3-3	667	-	-	550	-	-	490	487,0	3,00
							484		
E4-4	672	-	-	558	554,0	4,00	510	511,0	1,00
				550			512		
E5-5	704	-	-	552	556,0	4,00	527	530,0	3,00
				560			533		
E6-6	750	-	-	579	-	-	532	543,0	11,00
							554		

Graf 6: Závislost pevnosti na tloušťce stěny zkušebních destiček pro očkovačla 1-6



Graf 7: Závislost pevnosti na použitém očkovadle (1-6) pro tloušťky destiček 3, 5 a 8 mm

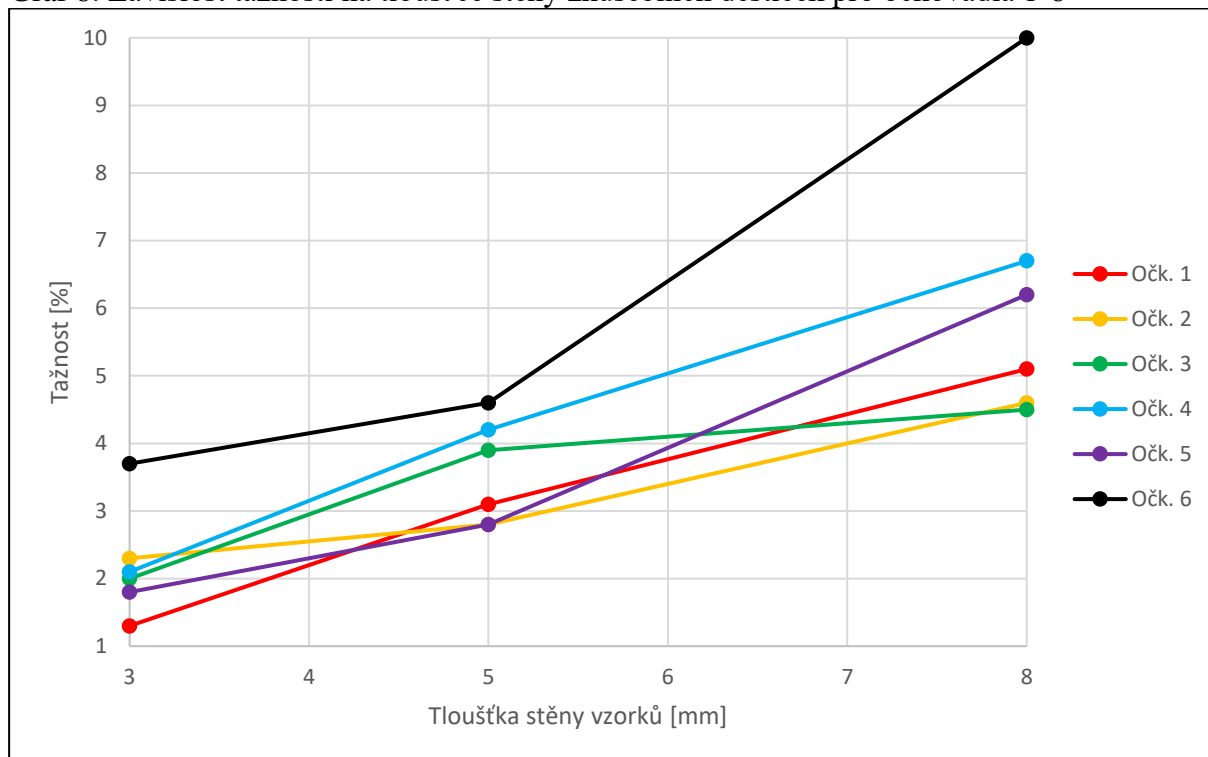


Z výsledků zkoušky tahem (graf 6) se potvrdil předpoklad, že s rostoucí tloušťkou stěny zkušebních destiček bude klesat jejich pevnost. Stejně tak se potvrdil předpoklad, že bude mít tato závislost stejný trend jako tvrdost, tedy že opravdu existuje paralelní vztah mezi pevností a tvrdostí litiny s kuličkovým grafitem, kdy tyto mechanické vlastnosti v rostoucí tloušťkou stěny klesají. Pevnost nejtenších destiček s tloušťkou 3 mm se pohybovala ve velkém rozmezí, a to mezi hodnotami cca 640-750 MPa, při tloušťce 5 mm byl rozptyl hodnot menší, cca 530-580 MPa, a při tloušťce 8 mm to bylo cca 480-540 MPa. Pokud by byl uvažován pouze vliv očkovadla na mechanické vlastnosti – tento vliv je vlastně také jediný, protože jde o jednu tavbu se stejným chemickým složením a stejnou lící teplotou – jednoznačně dosahovalo nejvyšších pevností a navzdory všem předpokladům dokonce i nejvyšších tažností očkovadlo č. 6, a to u všech tloušťek zkušebních destiček. V tomto očkovadle byl nejvyšší podíl Si z očkovadel použitých v tavbě E, aktivními prvky pak byly Mg, Al a Ca. Druhé nejvyšší pevnosti, a to opět pro všechny tloušťky, se dosáhlo použitím očkovadla č. 5. Naopak nejhorší pevnosti se u 3 mm a 5 mm destiček dosáhlo použitím očkovadla č. 1. (Si, Mg, Al, Ca), na 8 mm destičce to bylo očkovadlo č. 2, které navíc obsahovalo Zr. Závislost tažnosti na tloušťce stěny má opět očekávaný trend, a sice že s rostoucí tloušťkou stěny tažnost také roste. Graf 10 vyjadřuje pro úplné doplnění zároveň závislost pevnosti i tažnosti na tloušťce stěny zkušební destičky.

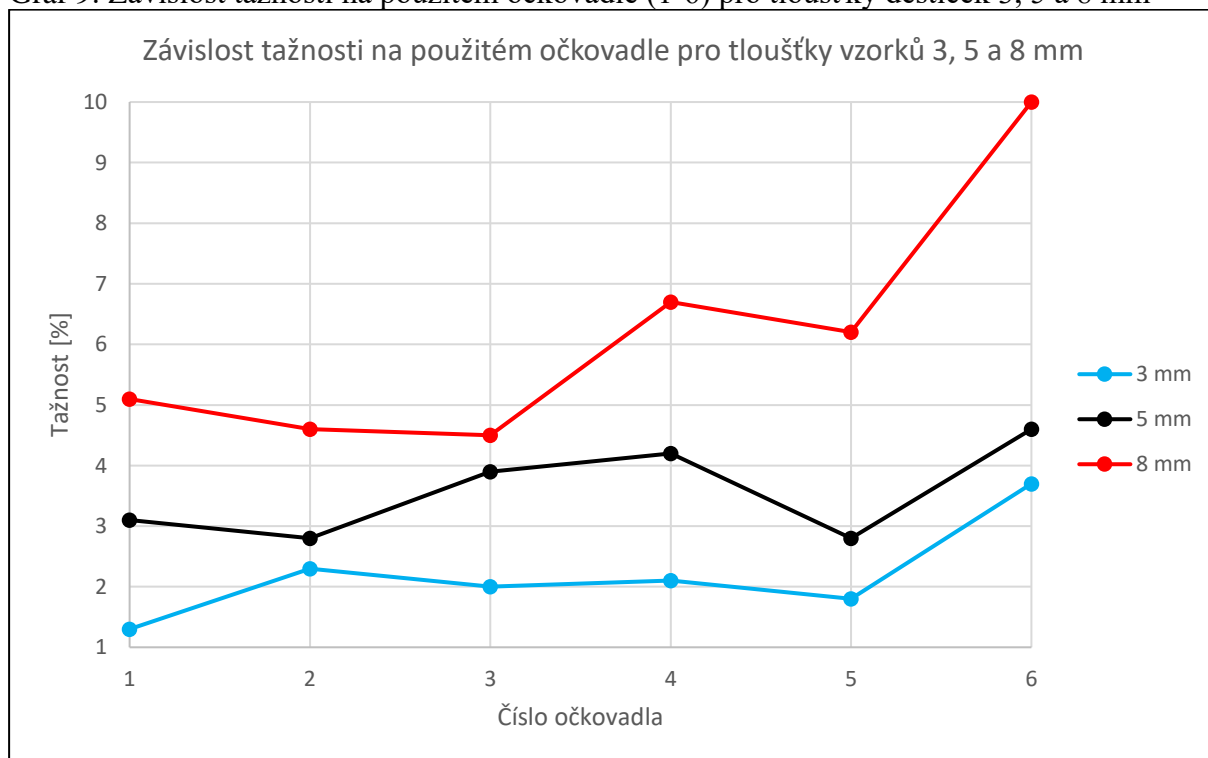
Tab. 23: Tažnosti destiček z tavby E

	Tažnost A40 [%]		
	3 mm	5 mm	8 mm
E1-1	1,3	3,1	5,1
E2-2	2,3	2,8	4,6
E3-3	2	3,9	4,5
E4-4	2,1	4,2	6,7
E5-5	1,8	2,8	6,2
E6-6	3,7	4,6	10

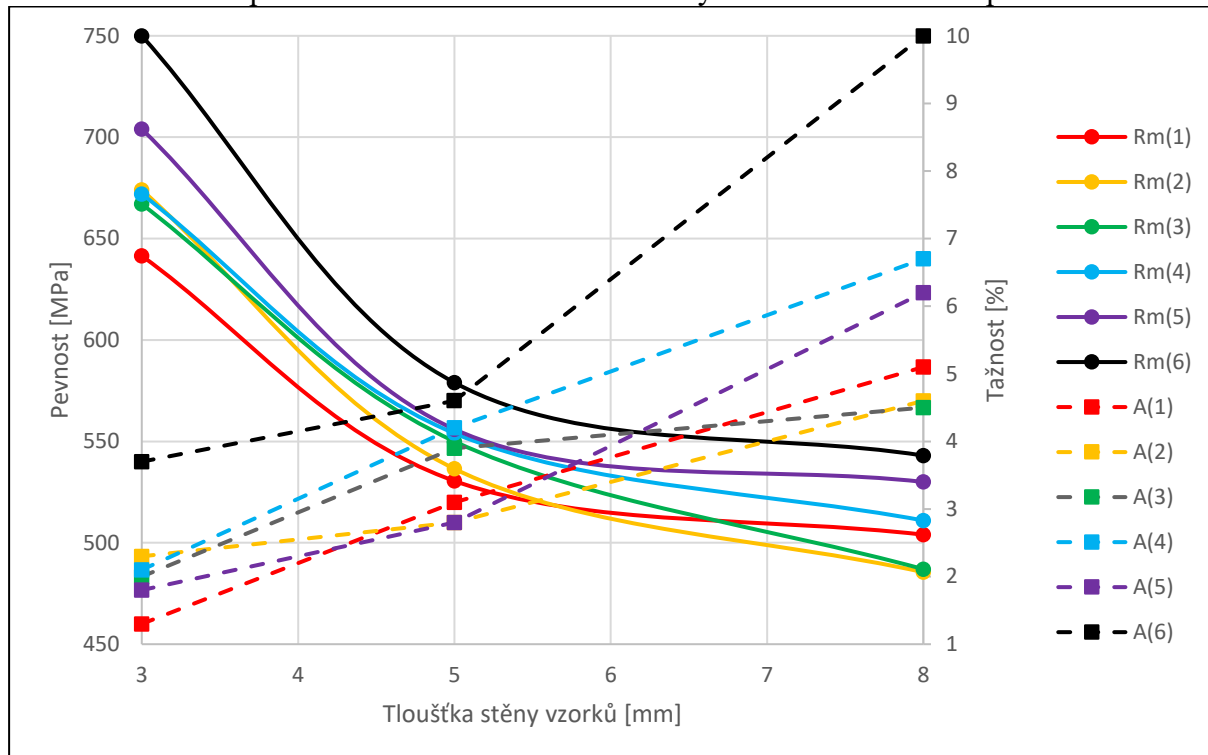
Graf 8: Závislost tažnosti na tloušťce stěny zkušebních destiček pro očkovadla 1-6



Graf 9: Závislost tažnosti na použitém očkovadle (1-6) pro tloušťky destiček 3, 5 a 8 mm

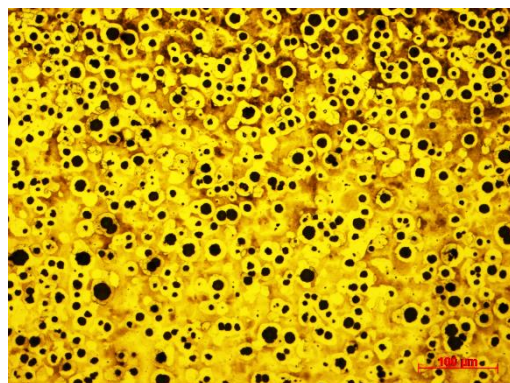
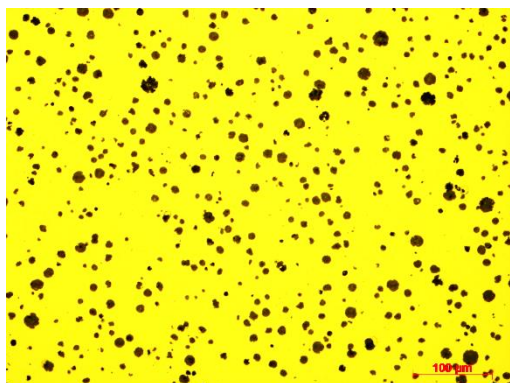


Graf 10: Závislost pevnosti a tažnosti na tloušťce stěny zkušebních destiček pro očkovadla 1-6

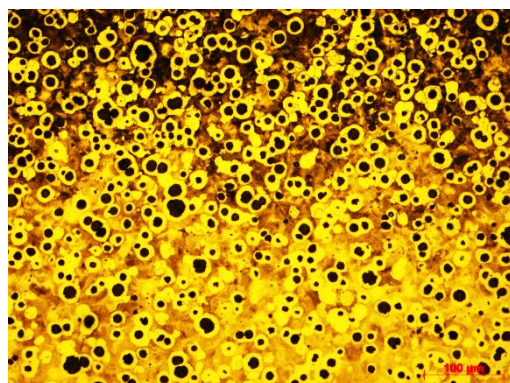
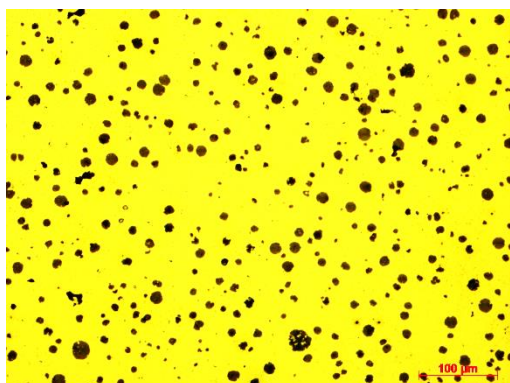


6.6 Vyhodnocení struktur

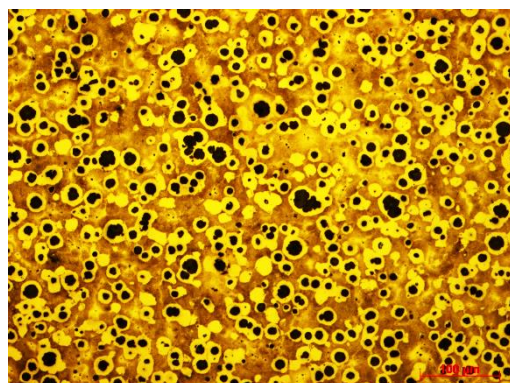
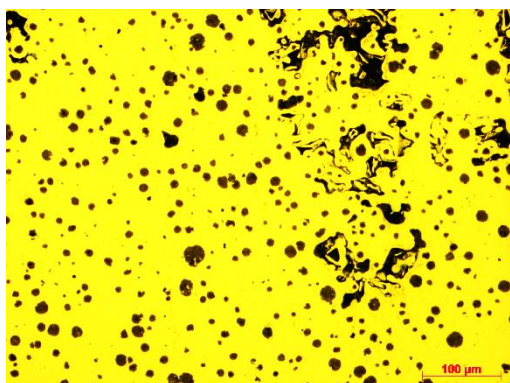
E1-1, 3 mm



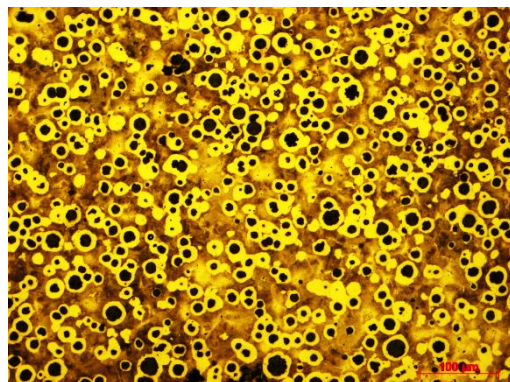
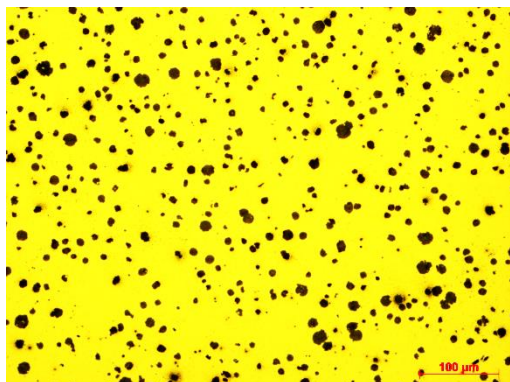
E2-2, 3 mm



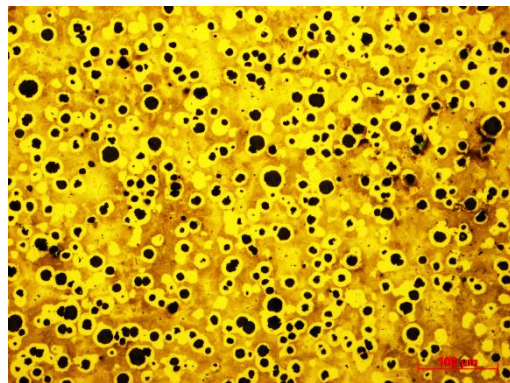
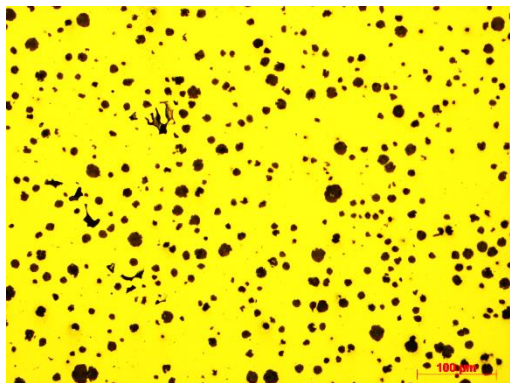
E3-3, 3 mm



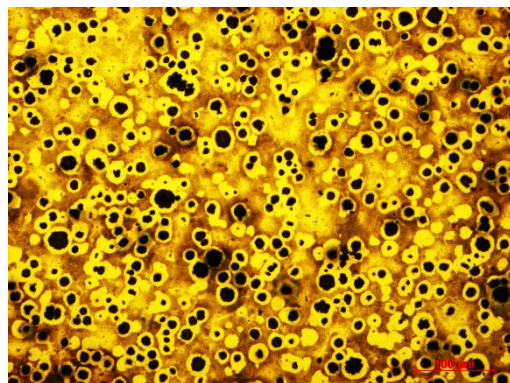
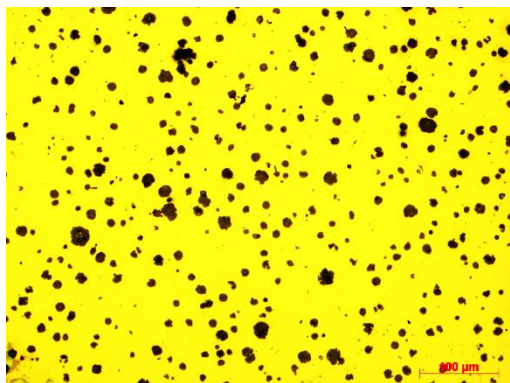
E4-4, 3 mm



E5-5, 3 mm

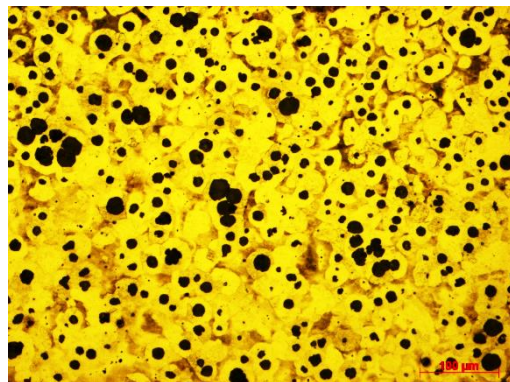
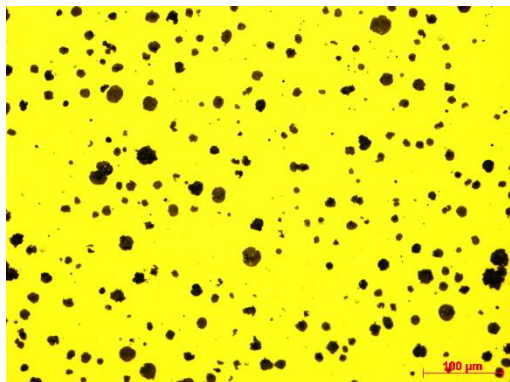


E6-6, 3 mm

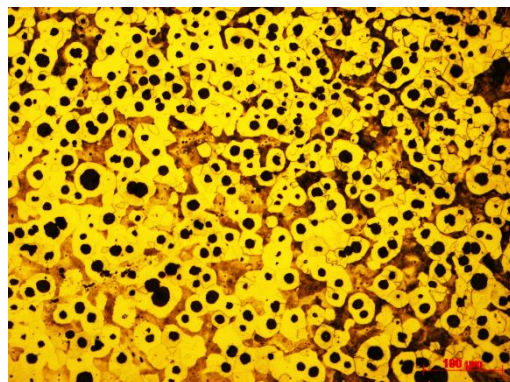
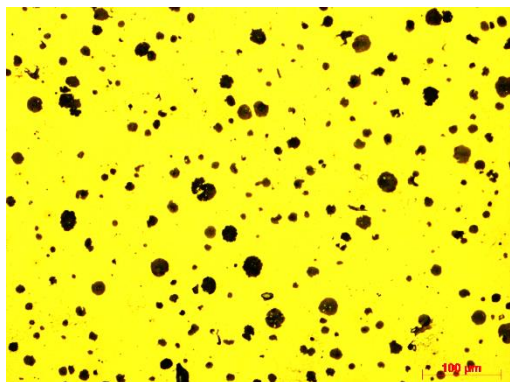


Obr. 31: Struktury 3 mm destiček (levý sloupec neleptáno, pravý sloupec leptáno)

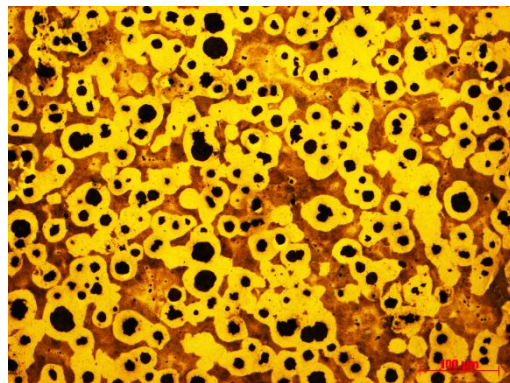
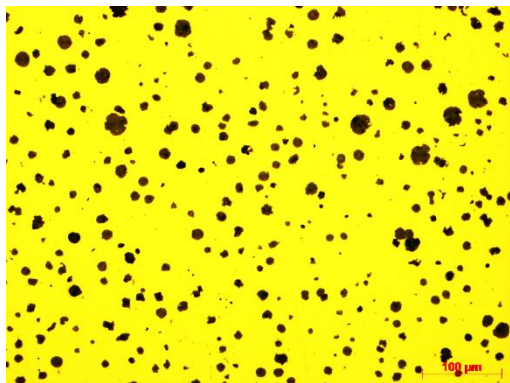
E1-1, 5 mm



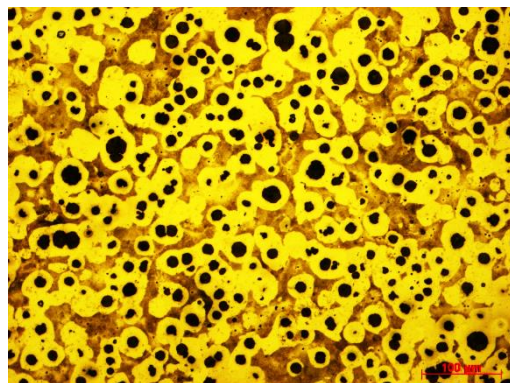
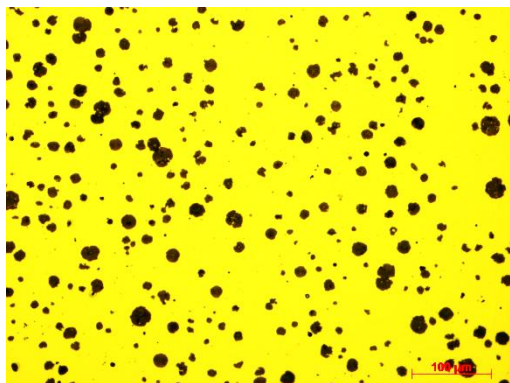
E2-2, 5 mm



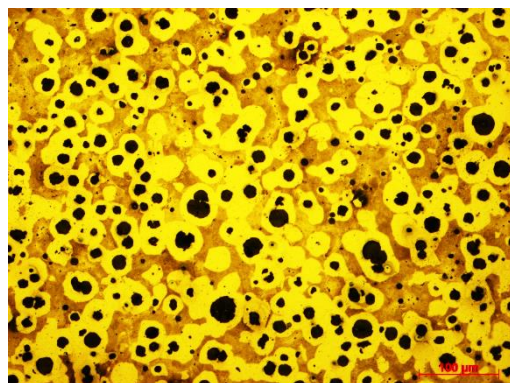
E3-3, 5 mm



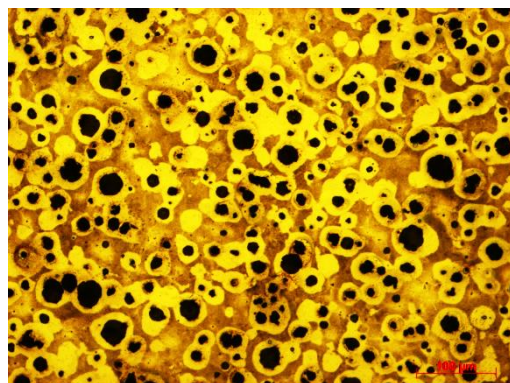
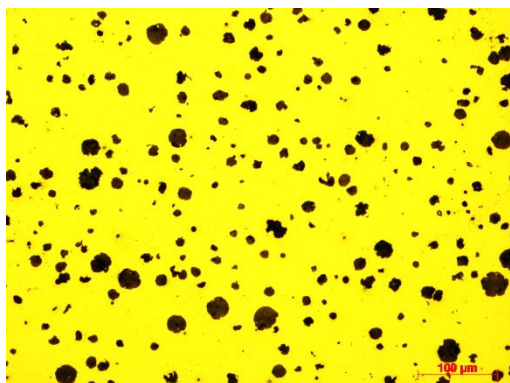
E4-4, 5 mm



E5-5, 5 mm

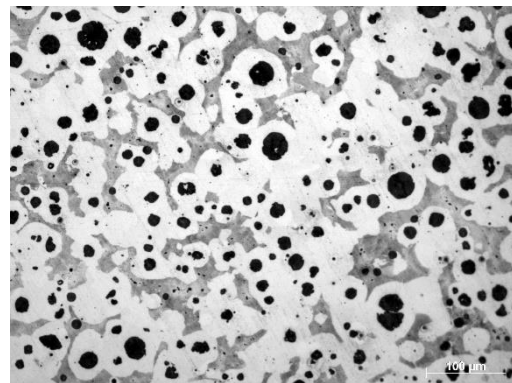
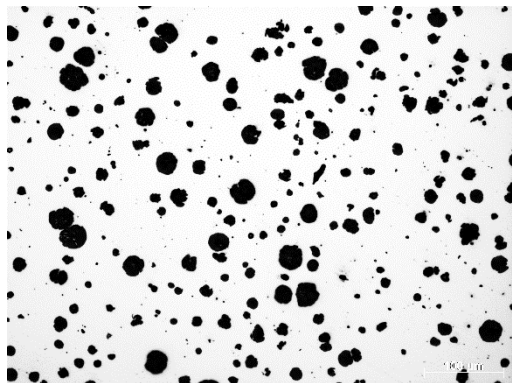


E6-6, 5 mm

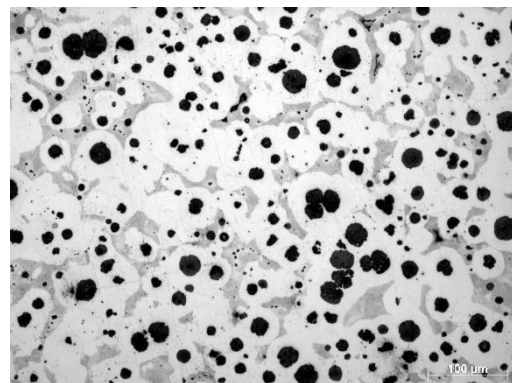
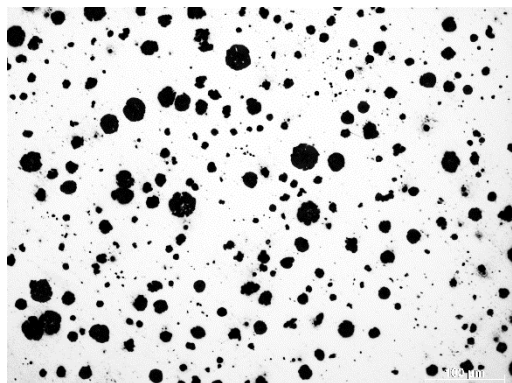


Obr. 32: Struktury 5 mm destiček (levý sloupec neleptáno, pravý sloupec leptáno)

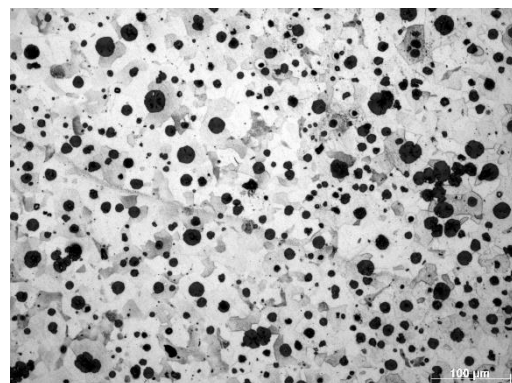
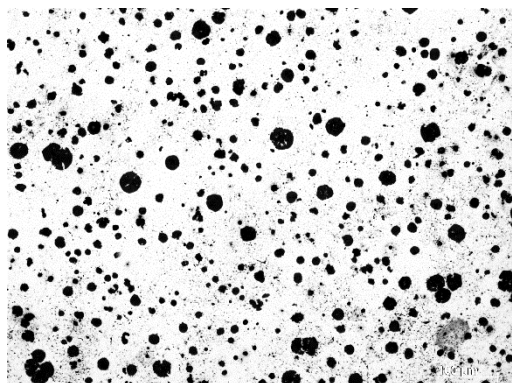
E1-1, 8 mm



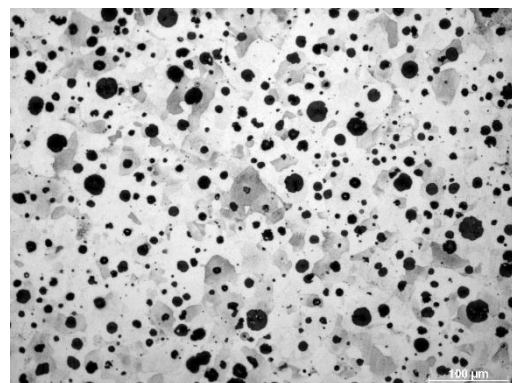
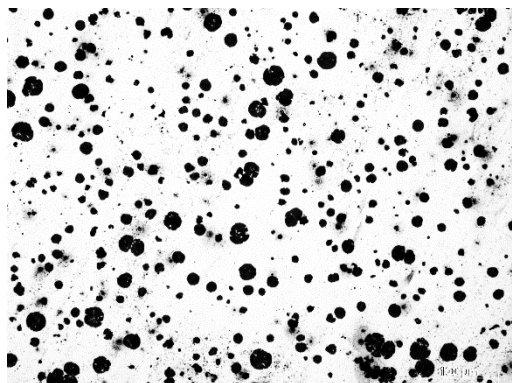
E2-2, 8 mm



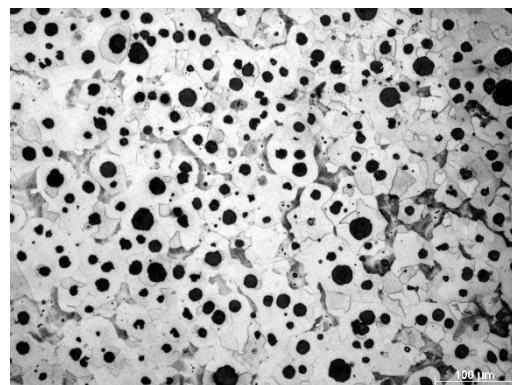
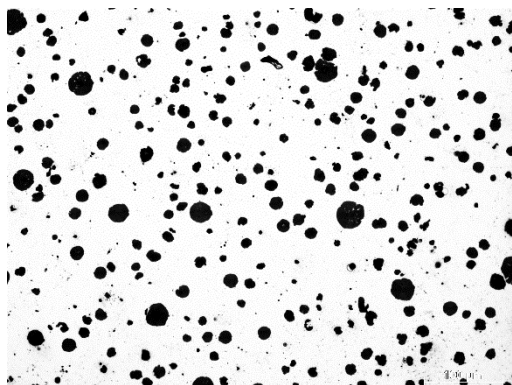
E3-3, 8 mm



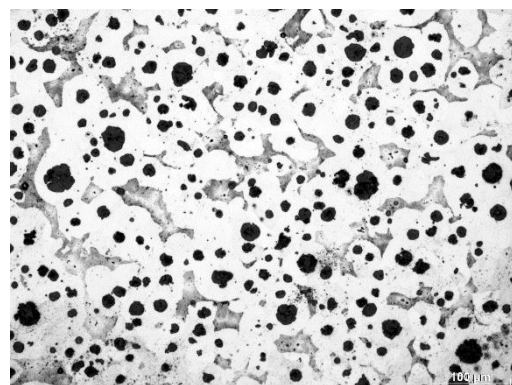
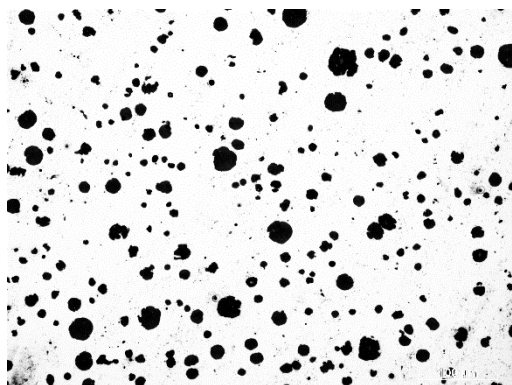
E4-4, 8 mm



E5-5, 8 mm

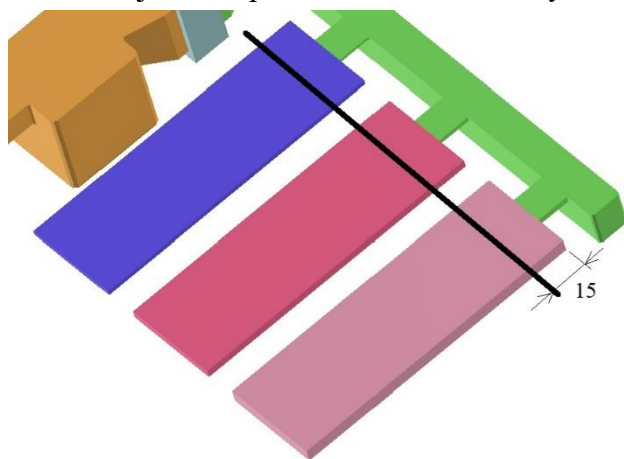


E6-6, 8 mm



Obr. 33: Struktury 8 mm destiček (levý sloupec neleptáno, pravý sloupec leptáno)

Vzorky pro metalografické výbrusy byly odebrány 15 mm od okraje bližšího zářezům (obr. 34) a přibližně ze středové části vzniklého plíšku. Na vzorcích se podle normy ČSN EN ISO 945-1 (Mikrostruktura litin – Část 1: Klasifikace grafitu vizuální analýzou) hodnotila velikostní třída grafitu, tvar grafitu a podíl feritu ve struktuře. Tvar grafitu je ve všech strukturách téměř dokonalý, proto je jeho tvar dle normy hodnocen číslem VI. Velikost kuliček grafitu a podíl feritu ve struktuře vyjadřuje tabulka (tab. 24), je ovšem nutné dodat, že jde o velmi zevrubný odhad vizuální analýzou. Pro přesné stanovení disperzity grafitu, jeho tvaru a podílu feritu/perlitu ve struktuře je nutné provést obrazovou analýzu.



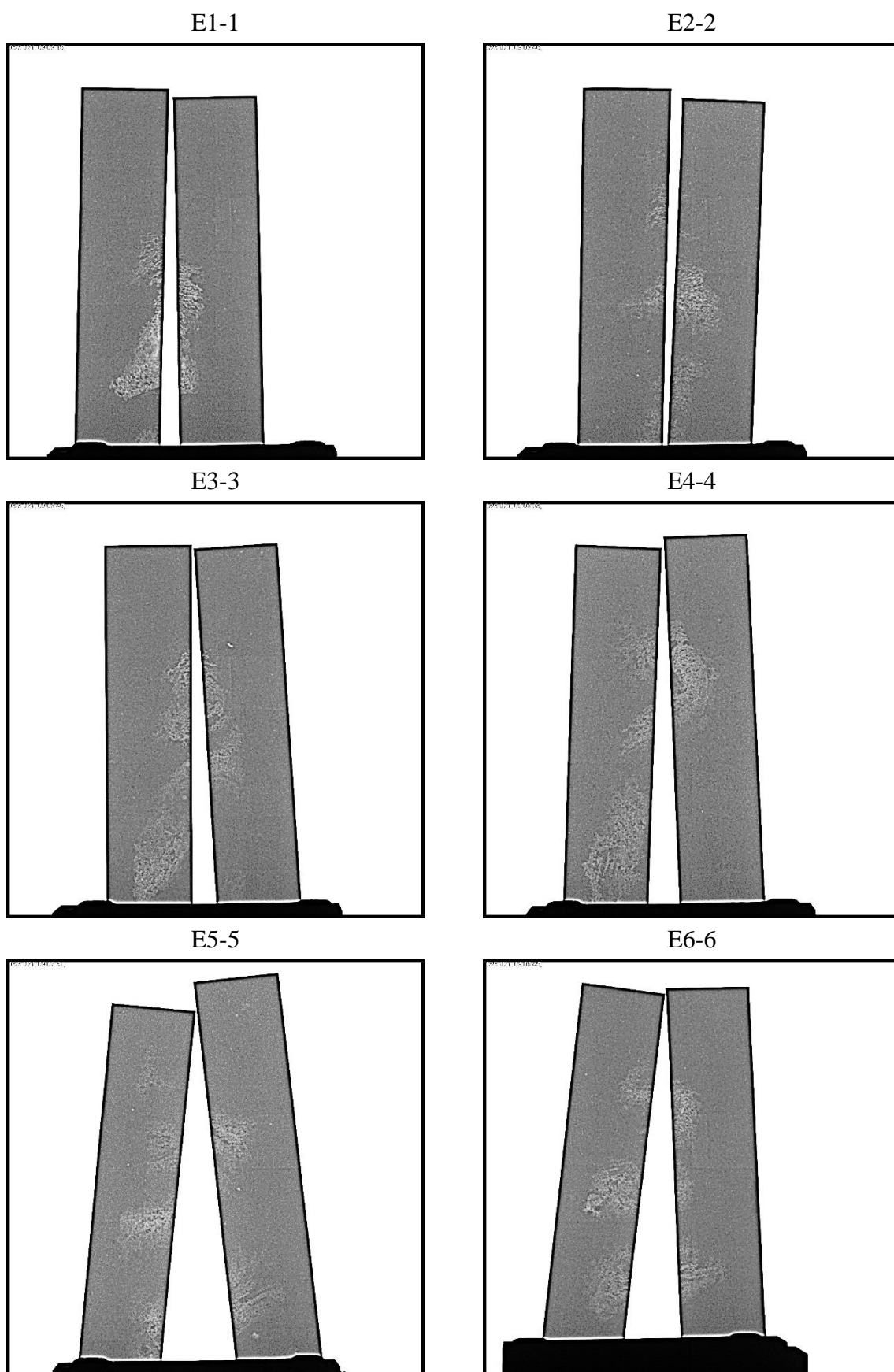
Obr. 34: Vzorky pro metalografické výbrusy

Tab. 24: Hodnocení velikosti grafitu a podíl feritu v tavbě E

Tloušťka	Tavba E	Velikost	Podíl feritu [%]
3 mm	E1-1	8	55-50
	E2-2	8	50-45
	E3-3	8	50-45
	E4-4	8	50-45
	E5-5	8	45-30
	E6-6	8	45-30
5 mm	E1-1	8-7	75-70
	E2-2	8-7	70-65
	E3-3	8-7	65-60
	E4-4	8-7	65-60
	E5-5	8-7	65-60
	E6-6	8-7	60-55
8 mm	E1-1	8-6	75-70
	E2-2	8-6	75-70
	E3-3	8-7	80-75
	E4-4	8-7	80-75
	E5-5	8-6	80-75
	E6-6	8-6	80-75

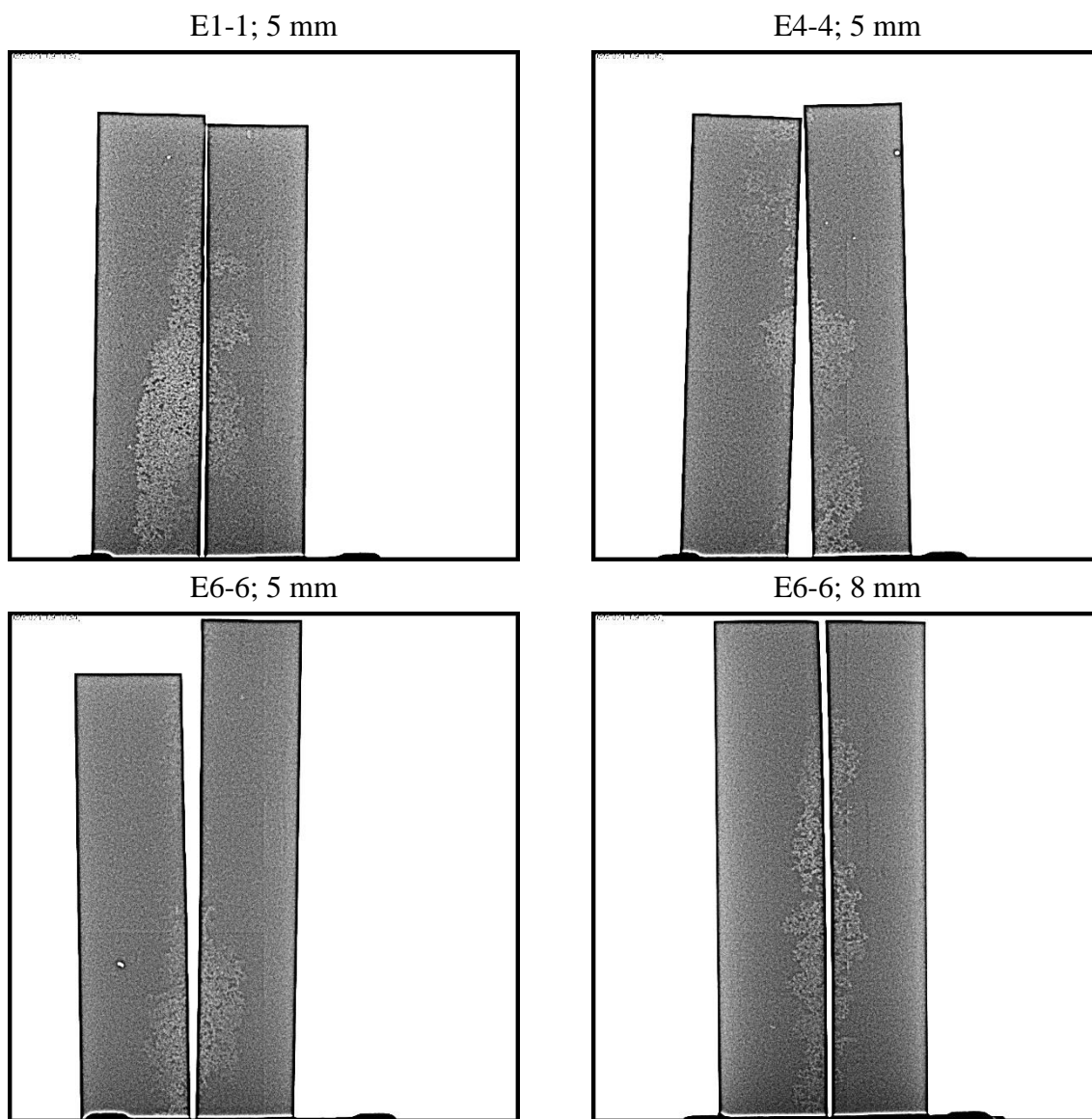
Zevrubně odvozené obsahy feritu vizuální analýzou nasvědčují nejvyšší pevnosti při použití očkovačel č. 5 a 6., neboť tyto struktury obsahují nejnižší podíl feritu ve všech tloušťkách, jsou tedy více perlitické. Vyšší podíl feritu ve strukturách vzorků E5-5 a E6-6 při 8 mm tloušťce destičky je zavádějící, ale to vysvětluje právě subjektivní vizuální analýza, která není a ani nemůže být dokonalá. Skutečné obsahy feritu musely být samozřejmě nižší než v ostatních strukturách u této tloušťky zkušební destičky. Pomocí metalografických výbrusů a vizuálním zkoumáním struktur byla alespoň do jisté míry ověřena pevnost určená tahovou zkouškou.

6.7 Osové řediny



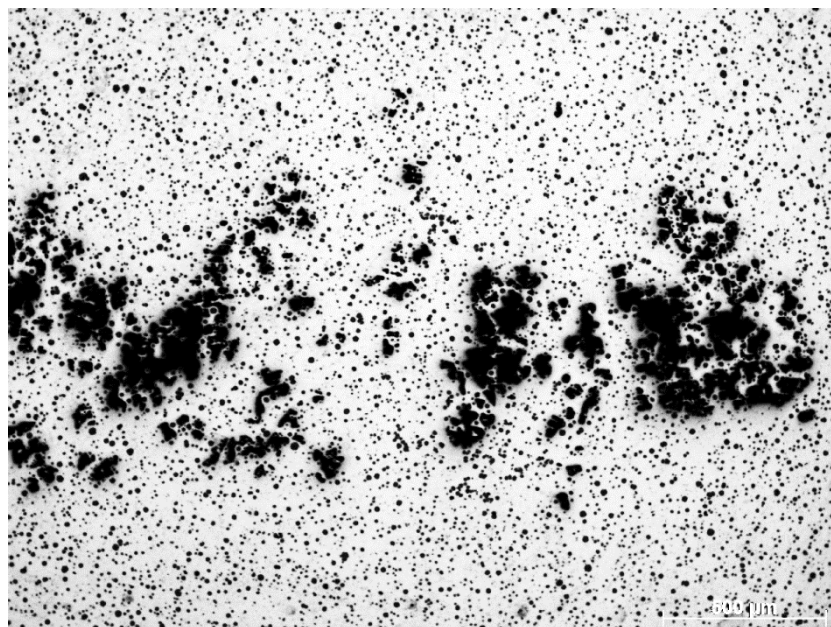
Obr. 35: Osové řediny na 3 mm destičkách z tavby E

Při prvotním měření tvrdosti docházelo ke znatelným rozdílům ve výsledcích u destiček s tloušťkou 3 mm – tvrdost všech tří vpichů na jedné destičce byla velmi často diametrálně rozdílná, např. 259 HBW, 216 HBW a 176 HBW (destička B4-10). Z tohoto důvodu se domluvilo prozáření některých vzorků rentgenovými paprsky na zařízení YXLON ve slévárně Kovolit, a.s. v Modřicích. Výsledek byl takový, že byly zjištěny rozsáhlé osově řediny soustředěné kolem středové části destičky a v ose její tloušťky. Proto bylo měření tvrdosti prováděné právě v této části na destičkách o tloušťce 3 mm nutné udělat znovu, tentokrát více při krajích destiček tak, aby se zamezilo kontaktu indentoru se staženinou. Navzdory tomu, že byly osově řediny zjištěny také na destičkách s tloušťkami 5 mm a 8 mm (obr. 36), nebyly zaznamenány žádné výrazné rozdíly po volbě jiného místa měření tvrdosti – patrně proto, že staženina vlivem tlustší stěny nezasahovala k povrchu destičky, jako tomu bylo při tloušťce stěny 3 mm (obr. 35). Navíc mohlo být také ovlivněno měření pevnosti při tahové zkoušce (a velmi pravděpodobně bylo), což se projevilo výrazně nižší naměřenou hodnotou meze pevnosti, než která byla pro daný typ tloušťky zkušební destičky obvyklá, proto nebyla tato hodnota do celkových výsledků zahrnuta. Byla snaha se co nejvíce osově staženině vyhnout, právě proto aby nedocházelo k měření chybných údajů, proto byly ploché vzorky pro tahovou zkoušku odebírány z okrajových částí destiček.



Obr. 36: Osově řediny na vybraných 5 mm a 8 mm destičkách z tavby E

Staženina zde vznikala patrně v důsledku současného tuhnutí od horní i spodní plochy destiček, neboť byly ve formě uloženy horizontálně. Zamezit vzniku takto veliké osově staženiny by se pravděpodobně dalo naklopením formy před odléváním tak, aby nebyly destičky pouze v horizontální poloze. Další, ovšem složitější variantou, je model s destičkami vertikálními (viz. Labrecque [14]), díky kterému se destičky v průběhu tuhnutí neustále doplňují a nový kov a nedochází tak k riziku vzniku staženin, nevýhodou ovšem je náročnější výroba složitějšího modelu. Současně byla přítomnost osových ředin zjištěna také na metalografickém výbrusu (obr. 37, 38).



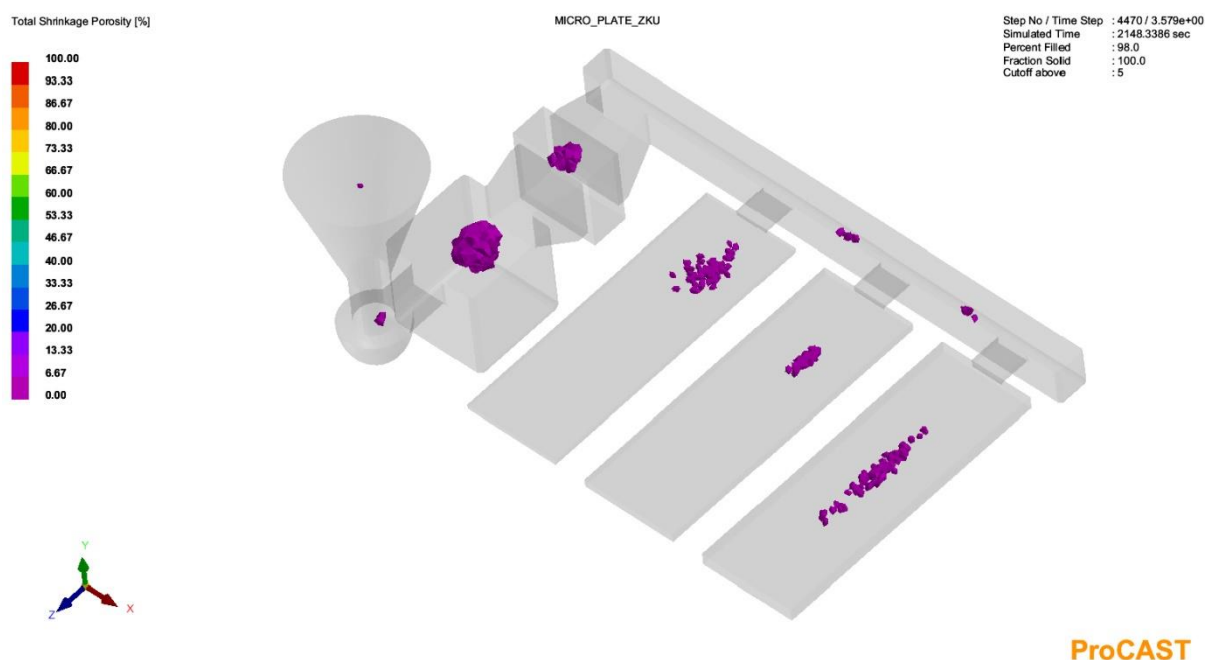
Obr. 37: Osová ředina mikro



Obr. 38: Osová ředina makro

6.8 Simulace

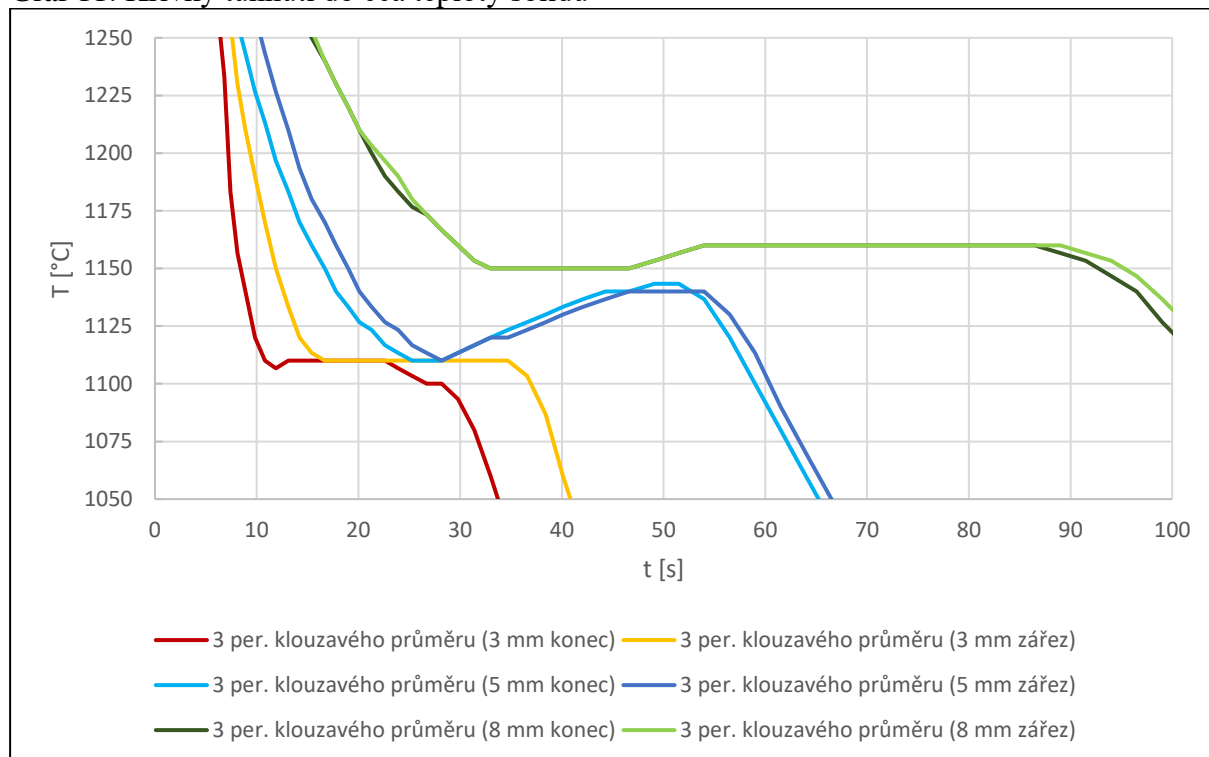
Poslední částí experimentu byla simulace odlévání v programu ProCAST a to právě z důvodu osových ředin, tedy zda-li software vyhodnotí pravděpodobnost jejich vzniku (obr. 39). Je ovšem důležité zmínit, že v tomto případě nebyl při vyhodnocování tuhnutí zahrnut do výpočtu proces očkování a grafitické expanze. Tato simulace byla spíše doprovodným prvkem v celém experimentu, která z části vyjasnila vznik osových ředin, které v odlitku doopravdy vznikly. Pokud totiž vznikly při simulaci, je pravděpodobné, že by vznikly také ve skutečnosti, i když jak již bylo zmíněno, nebyl zde zahrnut vliv očkování a grafitické expanze, která by měla v reálných podmínkách vznik staženin částečně nebo zcela eliminovat. Přestože však byla tavenina řádně naočkována, grafitická expanze nebyla vlivem extrémně vysoké rychlosti současného tuhnutí destiček dostatečná, a proto tyto řediny vznikly.



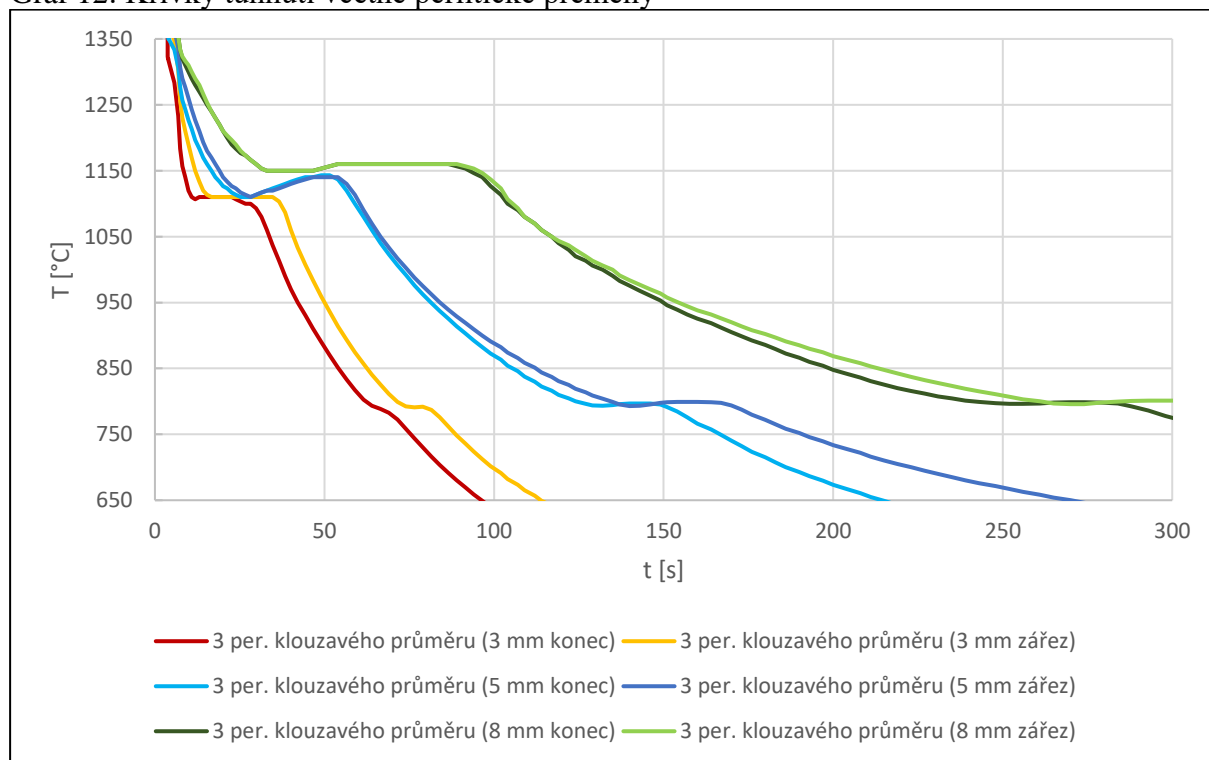
Obr. 39: Vznik staženin při simulaci odlévání v programu ProCAST

Ze simulace také vznikla data pro sestavení křivek tuhnutí, a to pro začátek a konec destičky – každé místo 15 mm od svého okraje (strana konce destičky, resp. strana zářezu) a na podélné ose. První graf (graf 11) se blíže zaměřuje na oblast tuhnutí, tedy je zde vidět teplota minima, teplota eutektická a teplota solidu. Zřetelný je také rozdíl mezi sledovanými body tuhnutí na obou koncích destiček. Na destičkách o tloušťce 8 mm a 5 mm je rozdíl nepatrný, naproti tomu při tloušťce destičky 3 mm je rozdíl významný, neboť jde zřetelně vidět, jak konec destičky tuhne o cca 10 s dříve než její začátek, tj. konec ze strany zářezu. Druhý graf (graf 12) zachycuje větší část chladnutí, a to včetně perlitické přeměny, která je viditelná mezi 750-850 °C.

Graf 11: Křivky tuhnutí do cca teploty solidu



Graf 12: Křivky tuhnutí včetně perlitické přeměny



ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo ověřit účinek grafitizačního očkovaní různými druhy očkovaadel na strukturu a mechanické vlastnosti tenkostěnných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem. Pro experimentální účely byly vybrány zkušební destičky, které se od sebe lišily tloušťkou stěny, a sice 3, 5 a 8 mm. Tuhnutí takto tenkostěnných odlitků má sklon vlivem vysoké rychlosti ochlazování k metastabilnímu tuhnutí, a právě grafitizačním očkováním má být podpořeno tuhnutí stabilní. Zároveň má být podpořena vyšší disperzita grafitu ve struktuře.

Teoretická část této práce se zabývá obecným uvedením tvárné litiny jako technického materiálu, jsou rozebírány vlivy legujících a stopových prvků a také tzv. aktivních prvků, které bývají obsažené v očkovaadlech. Aktivní prvky jsou právě ty, které podporují nukleaci a růst vylučovaného grafitu, který je v grafitické litině žádoucí formou uhlíku. Zejména u tenkostěnných odlitků je proces očkovaní prakticky nevyhnutelný. Dále jsou popsány úskalí, s nimiž se musejí technologové ve slévárnách při výrobě tenkostěnných odlitků potýkat, a sice vliv tloušťky stěny a rychlosti ochlazování, rychlost tuhnutí a zásady, které je při výrobě tvárné litiny vhodné dodržet. Nakonec jsou detailně rozebrány výrobní postupy litiny s kuličkovým grafitem – očkování a modifikace.

Experimentální část byla zaměřena na ověření účinku vybraných očkovaadel na strukturu a mechanické vlastnosti tenkých zkušebních destiček. Dohromady bylo na výrobu těchto destiček použito 11 očkovaadel, 2 modifikační předslitiny a odformováno bylo celkem 30 forem, do nichž bylo postupně odlito 5 taveb tvárné litiny. Nejprve byla dle normy ČSN EN ISO 6506-1 změřena tvrdost podle Brinella, a to tak, že do každé destičky byly udělány tři vpichy indentorem, a takto postupně vznikl soubor tvrdostí pro každou tloušťku zvlášť. Výsledky měření tvrdosti byly takové, že pro tloušťky 3 mm se tvrdost pohybovala cca 260-280 HBW, pro 5 mm 210-230 HBW a pro 8 mm 190-210 HBW. Dá se říct, že účinek očkovaadel nebyl na tvrdosti nijak zvlášť znatelný, a to i proto, že měla každá tavba mírně odlišné chemické složení, a protože bylo taveb celkem 5, nešlo jednoznačně určit, které očkovaadlo působí více a které méně – naopak tomu bylo u pevnosti. Při prvotním měření tvrdosti byly ovšem rozptyly podstatně větší, což následně vedlo k odhalení soustředných ředin u všech tloušťek stěn. Tyto řediny zde patrně vznikly vlivem velmi vysoké rychlosti současného tuhnutí. Dále byly z destiček vyrobeny ploché vzorky obdélníkového průřezu pro určení pevnosti a tažnosti dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Toto měření mohlo být do jisté míry ovlivněno vznikem ředin, proto byly ploché vzorky, u kterých byla zřetelně viditelná vada na povrchu lomové plochy, vyřazeny ze souboru naměřených hodnot. Výsledek byl takový, že použitím očkovaadla č. 6. bylo dosaženo nejvyšší pevnosti a překvapivě zároveň také tažnosti u všech zkoumaných tloušťek stěn, což je zvláštní, neboť obecně s rostoucí pevností litiny klesá její tažnost. V pořadí druhé nejvyšší pevnosti bylo dosaženo při použití očkovaadla č. 5., naopak nejhorších výsledků pevnosti se dosáhlo použitím očkovaadel č. 1 a 2. Dále byly udělány metalografické výbrusy pro vybranou tavbu. Potvrdilo se, že s klesající tloušťkou stěny, a tedy vyšší rychlostí ochlazování, vzrůstá disperzita grafitu (na základě odhadu z vizuální analýzy, neboť nemohla být provedena analýza obrazová) a zároveň se snižuje průměr grafitových kuliček. Nakonec byla provedena také simulace odlévání, která právě poukázala na vznik ředin ve všech zkoumaných tloušťkách stěn. Je ovšem důležité zdůraznit, že výpočet nezahrnoval vliv očkovaní a grafitické expanze během tuhnutí. Pro další zkoumání tvárné litiny na tomto modelu je simulace bezpochyby vhodným nástrojem.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] CAEF: The European Foundry Association. GJUTERI FÖRENINGEN: Swedish Foundry Association [online]. 2017 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: https://www.gjuteriforeningen.se/media/297967/caef-comm-for-economics-and-stat_2017-complete.pdf
- [2] ROUČKA, Jaromír. Metalurgie litin: Učební texty vysokých škol. Brno: PC-DIR Real, 1998. ISBN 80-214-1263-1.
- [3] PEDERSEN, Karl Martin a Niels TIEDJE. Numerical modelling of thin-walled hypereutectic ductile cast iron parts. *Acta Materialia*. 2006, 54(19), 5103-5114. Dostupné z: doi:<https://doi-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/10.1016/j.actamat.2006.06.049>
- [4] KAŇA, V., A. ZÁDĚRA, V. PERNICA a J. MOKRÝ. Výroba a vlastnosti legovaných litin. Slévárenské dny: Sborník 56. Slévárenských dní [online]. Brno: Česká slévárenská společnost, 2019 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: https://www.slevarenskedny.cz/sborniky/56_SD_SBORNIK.pdf
- [5] PODRÁBSKÝ, Tomáš a Simona POSPÍŠILOVÁ. Struktura a vlastnosti grafitických litin: Studijní opora. Struktura a vlastnosti grafitických litin [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/savgl/>
- [6] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [7] OTÁHAL, Vlastislav. Tvárná litina: Litina s kuličkovým grafitem. Brno, 2006. Monografie. OtahalConsult.
- [8] Elkem Foundry Products: Overview of alloying elements and their effects in ductile iron. Foundry Gate [online]. Oslo: Elkem AS, 2011 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://foundrygate.com/upload/artigos/7ZmcrE9zgVGm6iKwHxeNNjbEdqt1.pdf>
- [9] FRAŚ, E., M. GÓRNY a H. LOPEZ. Thin Wall Ductile Iron Castings as Substitutes for Aluminium Alloy Castings. *Archives of Metallurgy and Materials* [online]. Varšava: Polish Academy of Sciences, 2014, 59(2), 459-465 [cit. 2021-5-16]. ISSN 17333490. Dostupné z: doi:10.2478/amm-2014-0076
- [10] YEUNG, C. F., H. ZHAO a W. B. LEE. The Morphology of Solidification of Thin-Section Ductile Iron Castings. *Materials Characterization* [online]. Elsevier Science, 1998, 40(4-5), 201-208 [cit. 2021-5-16]. ISSN 1044-5803. Dostupné z: doi:10.1016/S1044-5803(98)00012-6
- [11] JAFARI, Hassan, Mohd Hasbullah IDRIS, Ali OURDJINI, Majid KARIMIAN a Gholamhassan PAYGANEH. Influence of Gating System, Sand Grain Size, and Mould Coating on Microstructure and Mechanical Properties of Thin-Wall Ductile Iron. *Journal of iron and steel research, international* [online]. Elsevier, 2010, 17(12), 38-45 [cit. 2021-5-16]. ISSN 1006-706X. Dostupné z: doi:10.1016/S1006-706X(10)60195-1
- [12] DUCTILE IRON SOCIETY: Ductile Iron Handbook. USA: American Foundry Society, 1993. ISBN 978-0-87433-124-0.
- [13] GÓRNY, Marcin. Solidification of thin wall ductile iron castings with hypereutectic composition. *ISIJ International* [online]. 2010, 50(6), 847-853 [cit. 2021-5-16]. ISSN 09151559. Dostupné z: doi:10.2355/isijinternational.50.847
- [14] LABRECQUE, C., M. GAGNÉ, A. JAVAID a M. SAHOO. Production and properties of thin-wall ductile iron castings. *International Journal of Cast Metals Research: Proceedings of the Seventh International Symposium on the Science and Processing of Cast Iron* [online]. Taylor & Francis, 2003, 16(1-3), 313-317 [cit. 2021-5-16]. ISSN 1364-0461. Dostupné z: doi:10.1080/13640461.2003.11819601

- [15] GÓRNY, M. Structure of ductile iron in thin walled castings. Archives of foundry engineering. Krakov: Polish Academy of Sciences, 2007, 7(4), 73-78. ISSN 1897-3310.
- [16] GAGNÉ, Martin a Chantal LABRECQUE. Thin wall castings - new opportunities for spheroidal graphite iron foundries. Slévárenství. Brno: Svaz sléváren ČR, 2005, 53(9), 398-404. ISSN 0037-6825.
- [17] Ductile iron data for design engineers. Ductile Iron Society [online]. 2013 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.ductile.org/didata/Section3/3part1.htm>
- [18] PEDERSEN, Karl Martin a Niels S. TIEDJE. Graphite nodule count and size distribution in thin-walled ductile cast iron. Materials characterization [online]. Elsevier, 2008, 59(8), 1111-1121 [cit. 2021-5-16]. ISSN 1044-5803. Dostupné z: doi:10.1016/j.matchar.2007.09.001
- [19] Novinky v oblasti očkování Litin: Casting Academy 2014. 29.09.-02.10.2014, Brno, Konference ASK Chemicals, 2014.
- [20] ROUČKA, Jaromír a Václav KAŇA. Očkování grafitických litin metodou in mould. Slévárenství. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2019, 67(9-10), 304-308. ISSN 0037-6825.
- [21] SKALAND, T. Nucleation Mechanisms in Ductile Iron. Proceedings of the AFS Cast Iron Inoculation Conference [online]. American Foundry Society, 2005, 13-30 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/238085519_Nucleation_Mechanisms_in_Ductile_Iron
- [22] ALONSO, G., D. M. STEFANESCU, P. LARRANAGA, R. SUAREZ a E. De la FUENTE. Reassessment of Nucleation Models for Spheroidal Graphite Through Advanced SEM Analysis [online]. Milwaukee, Wisconsin: American Foundry Society, 2017 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/316551495>
- [23] SKOČOVSKÝ, Petr, Peter PALČEK, Radomila KONEČNÁ a Ladislav VÁRKOLY. Konštrukčné materiály. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2000, 338 s. ISBN 80-7100-608-4.
- [24] STEFANESCU, Doru M., G. ALONSO, P. LARRANAGA, E. De la FUENTE a R. SUAREZ. Reassessment of crystal growth theory of graphite in cast iron. Materials Science Forum [online]. Trans Tech Publications, 2018, 925, 36-44 [cit. 2021-5-16]. ISBN 9783035710557. ISSN 1662-9752. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.925.36
- [25] FERRO, P., A. FABRIZI, R. CERVO a C. CAROLLO. Effect of inoculant containing rare earth metals and bismuth on microstructure and mechanical properties of heavy-section near-eutectic ductile iron castings. Journal of materials processing technology [online]. Elsevier, 2013, 213(9), 1601-1608 [cit. 2021-5-16]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2013.03.012
- [26] QING, Jingjing, Von L. RICHARDS a David C. Van AKEN. Examination of Spheroidal Graphite Growth and Austenite Solidification in Ductile Iron. Metallurgical and Materials Transactions: Physical Metallurgy and Materials Science [online]. New York: Springer US, 2016, 47(12), 6197-6213 [cit. 2021-5-16]. ISSN 1073-5623. Dostupné z: doi:10.1007/s11661-016-3783-1
- [27] Inoculation Mechanisms. Teknik Pengecoran Logam [online]. 2011 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <http://ferro-casting-ductile.blogspot.com/>
- [28] Metallurgy: Product Line Overview. ASK Chemicals: We advance your casting [online]. Hilden, Německo [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.ask-chemicals.com/foundry-products/products/metallurgy-products/inoculants>

- [29] Solidification of iron castings: The influence of inoculation. Vesuvius [online]. 2016 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <http://download-centre.foseco.com/en/download-centre/wallcharts/>
- [30] Očkování do proudu kovu. SINTO AMERICA: Auto Pouring Systems: P-Series [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://sintoamerica.com/product/p-series/>
- [31] MUHMOND, Haji Muhammad. On the Inoculation and Graphite Morphologies of Cast Iron. Stockholm, 2014. Dizertační práce. Department of Materials Science and Engineering, The Royal Institute of Technology.
- [32] ALINOC Inoculant: Elkem Foundry Products. Yumpu [online]. Oslo, 2012 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/en/document/read/11944545/alinocr-inoculant-elkem>
- [33] MASCHKE, W. a M. JONULEIT. Inoculation of Cast Iron. ASK CHemicals [online]. Dublin, Ohio, USA: ASK Chemicals L.P. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.ask-chemicals.com/foundry-products/products/metallurgy-products/inoculants>
- [34] Foundry Products. Ferroglobe [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.ferroglobe.com/products/foundry-products/>
- [35] Tundish. Foundry Lexicon [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/tundish-cover-process-4116/?cHash=44845b6d45794a9bd605ca9c951b4d15>
- [36] Konvertor. Foundry Lexicon [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/georg-fischer-converter-process-4255/?cHash=7e0a58206605f39d7d0922b9d6e0a146>
- [37] QIZHOU, Cai a Wei BOKANG. Recent development of ductile cast iron production technology in China. China foundry. Foundry Journal Agency, 2008, 5(2), 82-91. ISSN 1672-6421. Dostupné také z: <https://doaj.org/article/9b3b437f721048549ba24a381a55b9e6>
- [38] Topseed® conditioner. Elkem: Elkem Silicon Products [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.elkem.com/silicon-products/iron-foundries/preconditioners-and-cover-materials/topseed-conditioner/>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Oblast optimálních obsahů C a Si	12
Obr. 2: ARA diagram nelegované LKG	16
Obr. 3: Tuhnutí tenkostěnných odlitků z LKG	17
Obr. 4: Tuhnutí odlitků z LKG s normální tloušťkou stěny	17
Obr. 5: Mezidendritické karbidy ve struktuře	17
Obr. 6: Závislost doby tuhnutí na modulu	18
Obr. 7: Vliv doby tuhnutí na disperzitu grafitu	19
Obr. 8: Archimédova spirála	20
Obr. 9: Struktura ve vzdálenosti 10 mm	20
Obr. 10: Struktura ve vzdálenosti 400 mm	20
Obr. 11: Struktura v 3 mm stěně	21
Obr. 12: Struktura v 10 mm stěně	21
Obr. 13: Vertikální zkušební destičky	21
Obr. 14: Vliv podílu LDASC v ostřivu na průběh ochlazování	24
Obr. 15: Vliv odvodu tepla na zabíhavost	24
Obr. 16: Model heterogenní nukleace	26
Obr. 17: Mechanismus šroubových dislokací	29
Obr. 18: Obvodový růst	29
Obr. 19: Difuze C skrz obálku aust	29
Obr. 20: Přechlazení pod rovnovážnou eutektickou teplotou	29
Obr. 21: Vliv aktivních složek v očkovačce na vznik vrstvy vhodné pro nukleaci grafitu	30
Obr. 22: Závislost tloušťky stěny na disperzitě grafitu vzhledem k různým akt. prvkům	31
Obr. 23: Závislost odeznívání očkovacího účinku na hloubce zákalky	31
Obr. 24: Očkování do proudu kovu	33
Obr. 25: Průřezy vtokové soustavy	33
Obr. 26: Tundish	36
Obr. 27: Modifikace v konvertoru	36
Obr. 28: Kompletní model odlitku	38
Obr. 29: Stopa po očkovacím tělísku	38
Obr. 30: Místa vpichu pro změření tvrdosti	42
Obr. 31: Struktury 3 mm destiček (levý sloupec neleptáno, pravý sloupec leptáno)	53
Obr. 32: Struktury 5 mm destiček (levý sloupec neleptáno, pravý sloupec leptáno)	54
Obr. 33: Struktury 8 mm destiček (levý sloupec neleptáno, pravý sloupec leptáno)	56
Obr. 34: Vzorky pro metalografické výbrusy	Chyba! Záložka není definována.
Obr. 35: Osové řediny na 3 mm destičkách z tavby E	58
Obr. 36: Osové řediny na vybraných 5 mm a 8 mm destičkách z tavby E	59
Obr. 37: Osová ředina mikro	Chyba! Záložka není definována.
Obr. 38: Osová ředina makro	Chyba! Záložka není definována.
Obr. 39: Vznik staženin při simulaci odlévání v programu ProCAST	Chyba! Záložka není definována.

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Rozmezí obsahů základních prvků v nelegované LKG	11
Tab. 2: Sloučeniny vhodné pro vznik nukleačních zárodků grafitu	28
Tab. 3: Přehled používaných očkovadel a jejich chemické složení	34
Tab. 4: Chemické složení očkovadel použitých pro experiment	39
Tab. 5: Označení vzorků dle tavby a očkovačla	39
Tab. 6: Požadované chemické složení	40
Tab. 7: Vsázkové suroviny pro tavbu A	40
Tab. 8: Chemické složení tavby A	40
Tab. 9: Vsázkové suroviny pro tavbu B	40
Tab. 10: Chemické složení tavby B	40
Tab. 11: Vsázkové suroviny pro tavbu C	41
Tab. 12: Chemické složení tavby C	41
Tab. 13: Vsázkové suroviny pro tavbu D	41
Tab. 14: Chemické složení tavby D	41
Tab. 15: Vsázkové suroviny pro tavbu E	41
Tab. 16: Chemické složení tavby E	42
Tab. 17: Tvrdosti destiček z tavby A	43
Tab. 18: Tvrdosti destiček z tavby B	44
Tab. 19: Tvrdosti destiček z tavby C	45
Tab. 20: Tvrdosti destiček z tavby D	46
Tab. 21: Tvrdosti destiček z tavby E	47
Tab. 22: Pevnosti zkušebních destiček z tavby E	48
Tab. 23: Tažnosti destiček z tavby E	49
Tab. 24: Hodnocení velikosti grafitu a podíl feritu v tavbě E	57

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Vliv tloušťky stěny na tvrdost – tavba A	43
Graf 2: Vliv tloušťky stěny na tvrdost – tavba B	44
Graf 3: Vliv tloušťky stěny na tvrdost – tavba C	45
Graf 4: Vliv tloušťky stěny na tvrdost – tavba D	46
Graf 5: Vliv tloušťky stěny na tvrdost – tavba E	47
Graf 6: Závislost pevnosti na tloušťce stěny zkušebních destiček pro očkovadla 1-6.....	48
Graf 7: Závislost pevnosti na použitém očkovadle (1-6) pro tloušťky destiček 3, 5 a 8 mm ..	49
Graf 8: Závislost tažnosti na tloušťce stěny zkušebních destiček pro očkovadla 1-6.....	50
Graf 9: Závislost tažnosti na použitém očkovadle (1-6) pro tloušťky destiček 3, 5 a 8 mm ...	50
Graf 10: Závislost pevnosti a tažnosti na tloušťce stěny zkušebních destiček.....	51
Graf 11: Křivky tuhnutí do cca teploty solidu.....	62
Graf 12: Křivky tuhnutí včetně perlitické přeměny	62